



HAL
open science

Mise en place d'une méthodologie pour la
caractérisation des états de surface à partir d'images
satellites multsources et multidates. Bassin versant
de Koumbaka, Mali

Anaïs Abraham

► To cite this version:

Anaïs Abraham. Mise en place d'une méthodologie pour la caractérisation des états de surface à partir d'images satellites multsources et multidates. Bassin versant de Koumbaka, Mali. Sciences de l'environnement. 2007. hal-02589457

HAL Id: hal-02589457

<https://hal.inrae.fr/hal-02589457>

Submitted on 15 May 2020

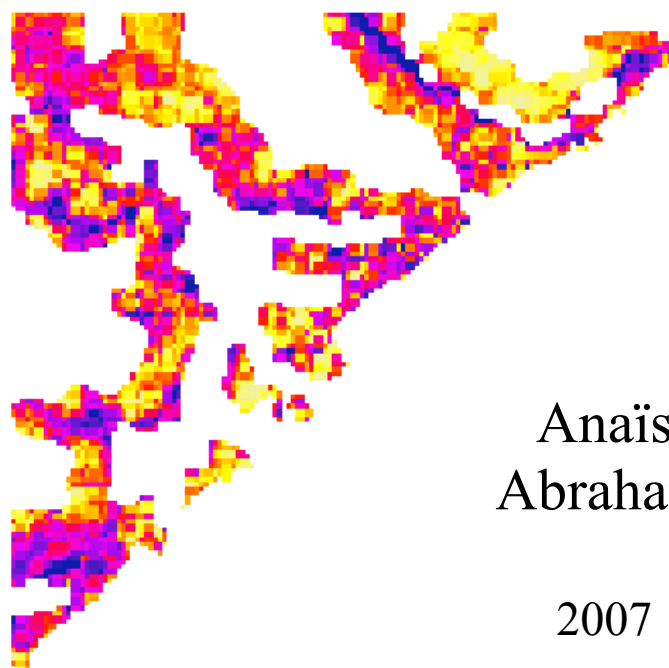
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport de stage

Mise en place d'une méthodologie pour la caractérisation
des états de surface à partir d'images satellitaires
multisources et multidates

Bassin versant de Koumbaka, Mali



Anais
Abraham

2007

Christian Puech
Directeur de recherche, UMR TETIS CEMAGREF Montpellier

Denis Ruelland
Ingénieur en traitement de données spatialisées appliquées à l'hydrologie,
CNRS UMR 5569 HydroSciences Montpellier

Résumé

Des changements globaux sont observables à l'échelle planétaire depuis quelques dizaines d'années. Ils sont induits par l'augmentation de la température.

Dans les zones sahéliennes, la hausse de température a pour impact une diminution de la pluviosité. Cette diminution se répercute à la fois sur le milieu lui-même par l'augmentation de la désertification et sur les systèmes humains par une extension spatiale des terres agricoles au détriment des espaces naturels.

La dynamique hydrique du milieu sahélien diminue depuis les années soixante dix, malgré l'augmentation des coefficients de ruissellement. Des études ont montré le lien entre l'augmentation du coefficient de ruissellement avec l'évolution de l'occupation du sol. L'extension des espaces de culture participe à cette augmentation puisque le coefficient de ruissellement d'un sol de culture est supérieur à celui d'un sol végétalisé naturel.

Les ressources en eau dans le milieu sahélien sont fragiles. Elles sont affectées par ce phénomène et il devient alors important de le caractériser.

La télédétection est un très bon outil pour caractériser les états de surface sur de grands espaces. L'étude menée dans ce travail de stage est axée sur la caractérisation des états de surface à partir d'images multisources et multidates d'un bassin versant du milieu sahélien (Koumbaka, Mali). L'objectif est de donner une méthode d'approche pour appréhender l'évolution de l'occupation du sol.

Deux méthodes de classification automatique (pixel à pixel et par analyse orientée objet) seront testées pour analyser le pouvoir discriminant des images.

Une méthode de discrimination spatiale sera testée afin de réduire l'espace de recherche à la zone de transition entre les sols de culture et les sols naturels. L'objectif de cette étape est de permettre une étude plus spécifique à l'évolution de l'espace agricole sur l'espace naturel.

Remerciements

Je voudrais remercier Mr Christian Puech et Mr Denis Ruelland pour avoir en cadré ce stage, pour m'avoir guidé.

Je remercie Mr Marc Robin pour avoir accepté d'être mon tuteur universitaire.

Des pensées amicales pour tous les stagiaires de la Maison de la télédétection.

Merci à Tristan pour m'avoir aidé à écrire quelques lignes de programmation.

Introduction.....	6
Problématique et contexte.....	7
1 Problématique.....	7
1.1 Le projet RESSAC.....	9
2 Le contexte.....	10
2.1 L'UMR TETIS.....	10
2.2 Description et objectif du stage.....	11
2.2.1 Méthodologie.....	12
2.3 La zone d'étude.....	14
2.3.1 Le Mali.....	14
2.3.2 Le bassin versant de Koumbaka.....	18
3 Documents et traitements utilisés.....	21
3.1 Les images.....	21
3.1.1 Les images Spot 1 et Spot 5.....	21
3.1.2 L'image Landsat 5.....	22
3.1.3 La photo aérienne.....	24
3.1.4 La carte topographique.....	24
3.1.5 Le MNT SRTM.....	25
3.2 Les relevés de terrain.....	25
3.3 Les pré-traitements sur les images.....	26
Chapitre 1 : Caractérisation des états de surface.....	27
4 Définition et préparation des éléments de travail.....	27
4.1 Définition d'une nomenclature de travail.....	27
4.2 Construction d'un jeu de données de travail et de validation.....	30
5 La cartographie de référence par photo-interprétation.....	31
6 Choix des canaux et des néocanaux.....	38
6.1 L'indice de végétation normalisé ou NDVI.....	38
6.2 L'indice de brillance ou IB.....	39
6.3 L'analyse en composante principale.....	40
6.4 Combinaison des canaux pour les applications automatiques.....	41
7 Les classifications.....	49
7.1 L'analyse pixel à pixel.....	50
7.1.1 La classification supervisée.....	50
7.1.2 Analyse des résultats par comparaison.....	53
7.2 L'analyse orientée objet.....	55
7.2.1 La classification.....	56
7.2.2 Analyse des résultats par comparaison.....	60
7.3 A propos de la limite nature-culture.....	62

Chapitre 2 : Caractérisation de la zone de transition entre espace cultivé et espace naturel ...	66
8 Définition des deux approches de discrimination spatiale.....	67
8.1 Détail de la méthodologie générale.....	68
8.2 Par distance euclidienne au réseau hydrographique.....	71
8.3 Par distance au réseau hydrographique pondérée par un coût	72
9 Application au MNT SRTM	74
9.1 Résultats	75
Discussion et conclusion.....	79
Bibliographie.....	81
Table des tableaux.....	83
Table des images.....	83
Table des cartes.....	84
Table des figures.....	84
Annexes.....	85

Introduction

Face aux changements globaux induits par l'augmentation de la température, diverses études tentent de comprendre les milieux et leurs dynamiques afin de préserver les ressources naturelles et les systèmes humains.

Le milieu sahélien est affecté par ces changements. Cela se traduit par une diminution de la pluviosité. La pluie est une source importante pour l'irrigation de l'agriculture paysanne. Ce phénomène induit une pression sur le territoire qui se traduit par une extension des terres agricoles au détriment des espaces naturels.

L'hydrodynamique est transformé par l'extension de l'espace agricole : les coefficients de ruissellement augmentent.

Pour garantir la pérennité des ressources en eau pour ce milieu il devine alors nécessaire d'étudier l'impact de l'évolution des états de surface sur l'hydrodynamique.

Ce stage s'inscrit dans cette étude. Il a pour objectif d'établir une méthode de caractérisation des états de surface à partir de documents multisources et multitudes.

Les travaux réalisés sont présentés dans ce document en quatre parties :

- Présentation générale du contexte, de la problématique et du milieu de l'étude et des images utilisées.
- Présentation des techniques d'extraction automatique de l'information (analyse pixel à pixel et analyse orientée objet) avec les résultats obtenus.
- Présentation d'une approche d'extraction spatiale de l'information (MNT) en vue de réduire la zone d'étude, avec les résultats obtenus.
- Discussion et conclusion.

Problématique et contexte

1 Problématique

De nombreuses études scientifiques montrent un changement climatique global. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat¹ affirme, dans son rapport *Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques*, qu'il y a eu une augmentation de la température de $0.6 \text{ °C} \pm 0.2\text{°C}$ durant le XX^{ème} siècle. Les divers scénarios prospectifs proposés à la fin du bilan envisagent une augmentation continue de la température en tout point du globe sur les décennies à venir. A l'échelle régionale les conséquences seraient variables. En effet, l'augmentation de la température entraînerait soit une augmentation, soit une diminution de la pluviosité. Par contre tous les phénomènes climatiques extrêmes verraient leur nombre et leur intensité croître.

Toujours à l'échelle régionale, le croisement entre les différentes études fait état d'une forte corrélation entre le changement de température et les changements observés sur de nombreux systèmes physiques et biologiques. Ces troubles ont des répercussions sur les sociétés et affectent beaucoup de systèmes humains. Dans l'expression système humain on entend : les ressources en eau, l'agriculture, la foresterie, les zones côtières et les systèmes marins, les établissements humains, l'énergie et l'industrie, les assurances et autres services financiers et la santé.

La capacité des sociétés à répondre et à s'adapter à ces troubles dépend de leur conditions sociales, économiques et environnementales. On parle alors de vulnérabilités des sociétés aux changements climatiques. Caractériser cette vulnérabilité est inévitable si l'on veut anticiper les impacts du phénomène et définir au mieux les actions et les comportements envisageables comme réponse des sociétés.

Spécifiquement au continent Africain le changement climatique a de forts impacts sur les ressources en eau, la production alimentaire, la santé humaine, la désertification et les zones côtières. Même si les caractéristiques environnementales et institutionnelles varient en

¹ Rapports du GIEC, 2001 : <http://www.ipcc.ch/pub/un/giecg1.pdf> et <http://www.ipcc.ch/pub/un/giecg2.pdf>

fonction des régions africaines, les sociétés sont définies comme étant très vulnérables aux changements climatiques.

Un bilan sur les variations des précipitation et des écoulements sur l'Afrique de l'Ouest et centrale a été fait par des chercheurs de l'Orstom (IRD)². L'étude des précipitations annuelles entre 1951 et 1989 montre une diminution des pluies nette à partir des années 70 sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest ainsi qu'une diminution, sur l'ensemble des cours d'eau et sans tenir compte des spécificités locales, des coefficients d'écoulement. En fonction des spécificités climatiques des zones étudiées ces évolutions observées varient.

Des études plus récentes et localisées sur le comportement hydrologique de certains cours d'eau, démontrent qu'il y a une augmentation des écoulements des débits pour la zone soudano-sahélienne directement liée avec les changements d'occupation du sol.

Mahé et al.³ montrent que l'évolution des états de surface joue un rôle prépondérant dans l'augmentation du débit de la rivière Nakambe (Burkina-Faso) à partir de 1970. En effet, l'augmentation de la température a induit une diminution des précipitations et une dégradation des sols, c'est à dire une diminution du couvert végétal. Parallèlement, on observe une intensification de l'agriculture et une augmentation spatiale de l'espace agricole. Les coefficients de ruissellement pour ces deux types d'occupation du sol étant plus importants que le coefficient de ruissellement d'un sol végétalisé entraîne une augmentation du coefficient de ruissellement total et donc une augmentation du débit de la rivière Nakambe.

Le projet RESSAC s'inscrit dans la continuité des études menées dans la région du Sahel. Son objectif est de déterminer la vulnérabilité des ressources en eau face aux changements environnementaux et à la pression anthropique.

L'étude de la vulnérabilité de ce milieu nous amène à comprendre ses systèmes et leur dynamique.

La pression anthropique est caractérisée par l'augmentation des surfaces agricoles et la pression démographique. Les changements environnementaux, induits par le changement climatique, sont caractérisés par une forte dégradation des sols.

² Mahé, G. and J.-C. Olivry (1995). "Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989." *Sécheresse* n°1 vol.6: p. 109-117.

³ Mahe, G., J.-E. Paturela, et al. (2005). "The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso " *Journal of Hydrology*

Ces facteurs ont un impact sur la réponse hydrologique des cours d'eau, ils augmentent le coefficient de ruissellement des sols.

Il apparaît alors nécessaire de caractériser dans le temps et l'espace l'évolution des ces facteurs.

A terme, en intégrant des données climatiques, anthropiques et environnementales dans divers modèles, le projet RESSAC a pour objectif de donner une évaluation envisageable de la vulnérabilité de l'espace sahélien pour les ressources en eau, à travers l'exemple du bassin versant du Bani (Mali).

1.1 Le projet RESSAC

Le projet RESSAC ou Vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme, fait partie du programme Vulnérabilité : milieux et climat financé par l'Agence National de la Recherche.

L'étude est réalisée au Mali, pour un sous bassin du fleuve Niger, le Bani (130 000km²). Des points méthodologiques et le calibrage des modèles vont être testés sur trois bassins versants expérimentaux, plus petits, et caractéristiques des trois environnements observés pour le bassin versant du Bani (les trois bassins versant sont déterminés selon l'évolution du gradient de précipitation).

Pour déterminer la vulnérabilité des ressources en eau au regard du changement climatique , il est nécessaire de caractériser la dynamique et l'impact de la pression anthropique et de l'évolution environnementale. Le projet Ressac est construit sur trois étapes :

- *L'analyse de la situation passée et actuelle.* Ici l'objectif est de calibrer les modèles hydrologiques sur l'actuel et le passé, et d'étudier les évolutions environnementales depuis les années 70 au travers des évolutions des états de surface. L'imagerie satellitaire sera utilisée ici comme outil d'aide à la caractérisation spatio-temporelle de l'évolution des états de surface.

- *L'évolution pour les 20 à 30 prochaines années à venir.* C'est la mise en place d'un scénario climatique pour déterminer l'impact du changement de température et de la baisse des précipitations sur les ressources en eau. C'est aussi la mise en place d'un scénario socio-économique, qui prend en compte l'évolution démographique, les nouvelles pratiques agricoles et pastorales des populations au regard des changements environnementaux.
- *La modélisation.* Application d'un premier modèle hydrologique global déjà éprouvé pour des bassins versants sahéliens. Ce modèle a trois entrées : les précipitations, l'évapotranspiration et la capacité de rétention des sols. Application d'un deuxième modèle agro-hydrologique qui prend en compte la spatialisation et l'utilisation des sols, la topographie et le climat.

L'objectif de ce projet est donc de pouvoir évaluer la vulnérabilité du milieu sahélien face aux changements climatiques à moyen et long terme. L'utilisation de modèles socio-économique, climatique et hydrologique a pour but de caractériser au plus proche du réel la dynamique physique de l'environnement.

2 Le contexte

2.1 L'UMR TETIS

La Maison de la télédétection de Montpellier regroupe différents centres et instituts de recherche pour constituer un pôle de recherche appliquée en télédétection et information géographique pour l'environnement, l'agriculture et les territoires.

Ce stage s'est déroulé au sein de l'Unité Mixte de Recherche Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale, ou UMR TETIS.

Cette unité de recherche regroupe trois instituts de recherche dont le Cemagref, auquel j'étais rattachée, le Cirad et l'Engref. L'UMR porte ses recherches sur les méthodes d'analyse, de représentation spatiale et de maîtrise de l'information sur les systèmes agri-environnementaux et territoriaux. Ses activités sont dirigées vers la formation, l'expertise et l'aide aux politiques publiques, en France comme à l'étranger (en collaboration avec des pays du Sud).

Le Cémagref est un organisme public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement. Ses recherches sont axées sur les ressources en eau de surface, les systèmes écologiques aquatiques et terrestres, les espaces à dominante rurale, les technologies pour l'eau, les agrosystèmes et la sécurité des aliments.

La finalité des travaux réalisés sont utilisés selon leurs besoins par les acteurs publics, les milieux économiques et les milieux scientifiques.

Avec dix implantations sur le sol français, le Cemagref emploie environ 1350 personnes pour un budget de 81,6 million d'euros.

2.2 Description et objectif du stage

C'est dans le cadre de *l'analyse de la situation passée et actuelle* que s'inscrit ce stage. Il s'intéressera au bassin versant expérimental de Koumbaka (87km²).

L'objectif est d'établir une méthode d'analyse pour caractériser les états de surface par imagerie spatiale.

Les données images disponibles pour l'étude générale du projet sont disparates dans le temps et les saisons, ainsi que dans leur format. En effet, on est en possession d'une image spot 1 d'une résolution de 10 m prise en saison humide en 1990, d'une image landsat 5 d'une résolution de 30 m prise en saison sèche en 1990, d'une photo aérienne d'une résolution de 3 m prise en saison sèche en 1991, d'un modèle numérique de terrain de type SRTM de résolution 90 m. Le problème qui se pose, et auquel je vais essayer de répondre, est de savoir quelles techniques d'extractions de l'information répondent au mieux aux attentes du projet pour les différents formats images et si il est éventuellement possible d'envisager l'étude d'une évolution à partir des résultats obtenus.

Pour pouvoir répondre à ces deux points, le travail de stage va être focalisé sur :

- La caractérisation des états de surface existant sur le territoire d'étude, pour étudier le pouvoir informatif des différents formats image utilisés.
- La caractérisation de la limite entre l'espace de culture et l'espace naturel. Ici le but est de répondre au besoin du projet quant à la détermination spatiale de la pression anthropique sur le milieu naturel tout en intégrant une dimension temporelle dans la caractérisation.

Je vais devoir mettre en place une méthodologie d'approche qui devra être, au mieux, reproductible.

Pour ce faire nous avons décidé de nous focaliser sur une date fixe (1990-1991) pour laquelle nous avons un maximum de documents (photo aérienne, image landsat et spot, Modèle Numérique de Terrain, carte topographique) et d'analyser leur potentiel informatif qui peut être commun ou différent.

Nous avons pensé à deux démarches d'analyse pour la comparaison des résultats :

- Mener le travail d'analyse des états de surface sur cette même date, faire des cartographies indépendantes pour chaque image (photo-aérienne, image spot 1 et landsat 5) puis comparer les résultats obtenus. Ici, c'est l'impact des formats sur les résultats qui est mis en évidence.
- Mener le travail d'analyse des états de surface en s'intéressant à leur évolution, c'est à dire par comparaison avec une référence. Dans cette démarche, nous avons rajouter une information supplémentaire : une image SPOT 5 prise en 2003. A partir de cette image nous avons réalisé une cartographie la plus précise possible de l'occupation du sol qui sera utilisée comme un document de référence. Ici nous mettons en évidence le potentiel d'analyse de l'évolution dans le temps des états de surface par comparaison des écarts entre les résultats indépendants de 1990-91 et cette cartographie de référence.

Nous avons choisi la deuxième démarche comme méthodologie générale du stage.

2.2.1 Méthodologie

Ce qui nous intéresse d'un point de vue global est la caractérisations des états de surface à partir de documents multisources. Les états de surfaces utiles à la problématique du projet

sont les surfaces agricoles qui sont représentatives de la pression anthropique et les espaces naturels végétalisés à très peu végétalisés qui sont représentatifs du changement climatique.

Pour pouvoir répondre au besoin de caractériser l'évolution, nous nous sommes penchés sur le problème de déterminer la « limite » entre l'espace de culture et l'espace naturel. Pouvoir caractériser l'évolution de cette limite c'est pouvoir caractériser l'évolution de la pression anthropique. La diminution des précipitations depuis les années 70 a entraîné une intensification de l'agriculture et une extension des surfaces cultivées vers les bas de versants en s'éloignant du réseau hydrographique. Cette extension se fait par endroit de façon diffuse et à d'autre de façon ponctuelle. La transition entre l'espace agricole et les milieux naturels est alors difficilement caractérisable par une « ligne » franche.

C'est pour cela que la caractérisation de la limite culture-nature va être appréhendée de deux façons différentes. Dans un premier temps on va essayer de différencier les sols agricoles des sols naturels à partir des techniques traditionnelles d'extraction de l'information sur image. Dans un deuxième temps on va chercher à réduire l'espace de travail par extraction de la zone où se situe cette limite, à partir d'une technique de discrimination spatiale fondée sur la notion de toposéquence. On parlera alors ici d'espace de variabilité ou de zone d'incertitude entre la limite culture-nature.

La méthodologie générale de travail pour caractériser les états de surface et la limite culture-nature, est construite sur deux étapes :

- La caractérisation des états de surface par l'application des différentes méthodes classiques d'extraction de l'information sur image. L'extraction de l'information se fera de façon automatique, elle sera basée sur la radiométrie et appliquée à l'ensemble des documents images :
 - Cartographie par classification supervisée classique (Erdas Imagine)
 - Cartographie par classification à partir de l'analyse orienté objet (eCognition)

Les classifications seront par la suite comparées à une cartographie de référence faite au préalable par photo-interprétation afin d'observer ou pas une évolution.

- La détermination de l'espace de variabilité de la limite culture-nature sur une base de morphologie. Introduction de la notion de toposéquence par l'application d'un

critère discriminatif qui tient compte de la pente et de la distance au réseau hydrographique (utilisation du MNT).

2.3 La zone d'étude

2.3.1 Le Mali

Le Mali est situé entre le 10^e et le 25^e degré de latitude Nord, et entre le 4^e degré de longitude Est et le 12^e degré de longitude Ouest. C'est un pays continental de l'Afrique de l'Ouest dont la capitale est Bamako. Sa superficie est de 1 241 138 km² pour une population de 11 000 000 d'habitants.

Il partage ses frontières avec au nord l'Algérie et la Mauritanie, à l'Est le Niger, au Sud le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et la Guinée, et à l'Est le Sénégal.

✓ Le relief :

Le Mali est un pays à relief peu marqué. La topographie est marquée par la géologie du territoire et varie en fonction des régions naturelles. En effet, dans le sud ce sont des plateaux gréseux qui dominent, avec une altitude moyenne de 200m dont les plus haut sommets, que l'on peut assimiler à des collines, ne dépassent pas plus de 1000m. De la boucle du Niger vers le nord s'étendent d'immenses plateaux recouverts d'ergs par endroit.

✓ Le climat :

Le relief étant peu marqué, le climat dépend surtout de l'exposition au vent, des précipitations et des températures.

Les saisons sont marquées par l'alternance d'une saison sèche, qui varie entre 9 et 5 mois du nord au sud, et d'une saison humide, qui varie de 3 à 5 mois du nord au sud.

On distingue quatre zones climatiques :

La zone sud-saharienne: c'est une zone hyper aride et désertique. La pluviométrie est faible on la mesure entre 0 et 250 mm/an, sa fréquence est aléatoire et entraîne parfois des

sécheresse. Les pluies sont fortes. Les températures sont élevées avec de grands écarts entre le jour et la nuit.

La zone sahélienne : C'est une zone aride. La pluviométrie est comprise entre 250 à 700 mm/an. Elle est caractérisée par une longue saison sèche de 9 à 11 mois.

La zone nord-soudanienne: c'est une zone semi-aride à subhumide. La pluviométrie est comprise entre 700 et 1 300 mm/an. Elle est caractérisée par une saison sèche de 4 à 6 mois. Les températures oscillent durant l'année entre 30 et 40°C.

La zone sud-soudanienne: c'est une zone subhumide. La pluviométrie est supérieures à 1 300 mm/an. Elle est caractérisée par une longue saison pluvieuse de 5 à 7 mois. La température est à peu près constante tout au long de l'année.

✓ La végétation :

Le domaine saharien : les pluies y sont rares et très espacées. L'eau a tendance à ruisseler ou à s'évaporer et à ne pas être absorbée par le sol. Le sol se couvre d'une couverture herbacée à la suite d'une averse.

Le domaine sahélien : ici la végétation est discontinue et clairsemée. Le couvert végétal est composé d'herbacés qui croît rapidement avec les averses, d'arbustes souvent épineux et d'arbres.

Le domaine soudanien : ce domaine fait la transition entre le domaine sahélien et le domaine guinéen. Il est essentiellement caractérisé par de la forêt claire, la strate herbacée est aussi présente.


Le domaine soudano-guinéen : ici la végétation peut être dense notamment sur les hauteurs des vallées. La végétation est caractérisée par de la forêt, de la savane et une strate herbacée.

✓ La culture :


La culture est de type extensive et elle se fait sous pluie. Elle se pratique donc de façon croissante du Nord vers le Sud selon un gradient de pluviométrie et de qualité des sols. Les cultures industrielles (coton, arachide, canne à sucre) que l'on trouve dans le sud sont largement plus faibles en surface que les cultures traditionnelles et vivrières (mil, maïs, sorgho, riz, blé). Les terres agricoles se situent dans les plaines mais aussi aux abords des villages où la population pratique une culture plus intensive de type maraîchère.


Végétation


Domaine saharien

 Végétation contractée, rare ou absente


Domaine sahélien

 Steppe sahélo-saharienne (buissons et épineux)


 Steppe arbustive

 Steppe arborée/arbustive avec tapis graminéen et localement passage des feux


Domaine soudanien

 Savane arborée/arbustive à *Adansonia digitata*, *Bombax costatum*

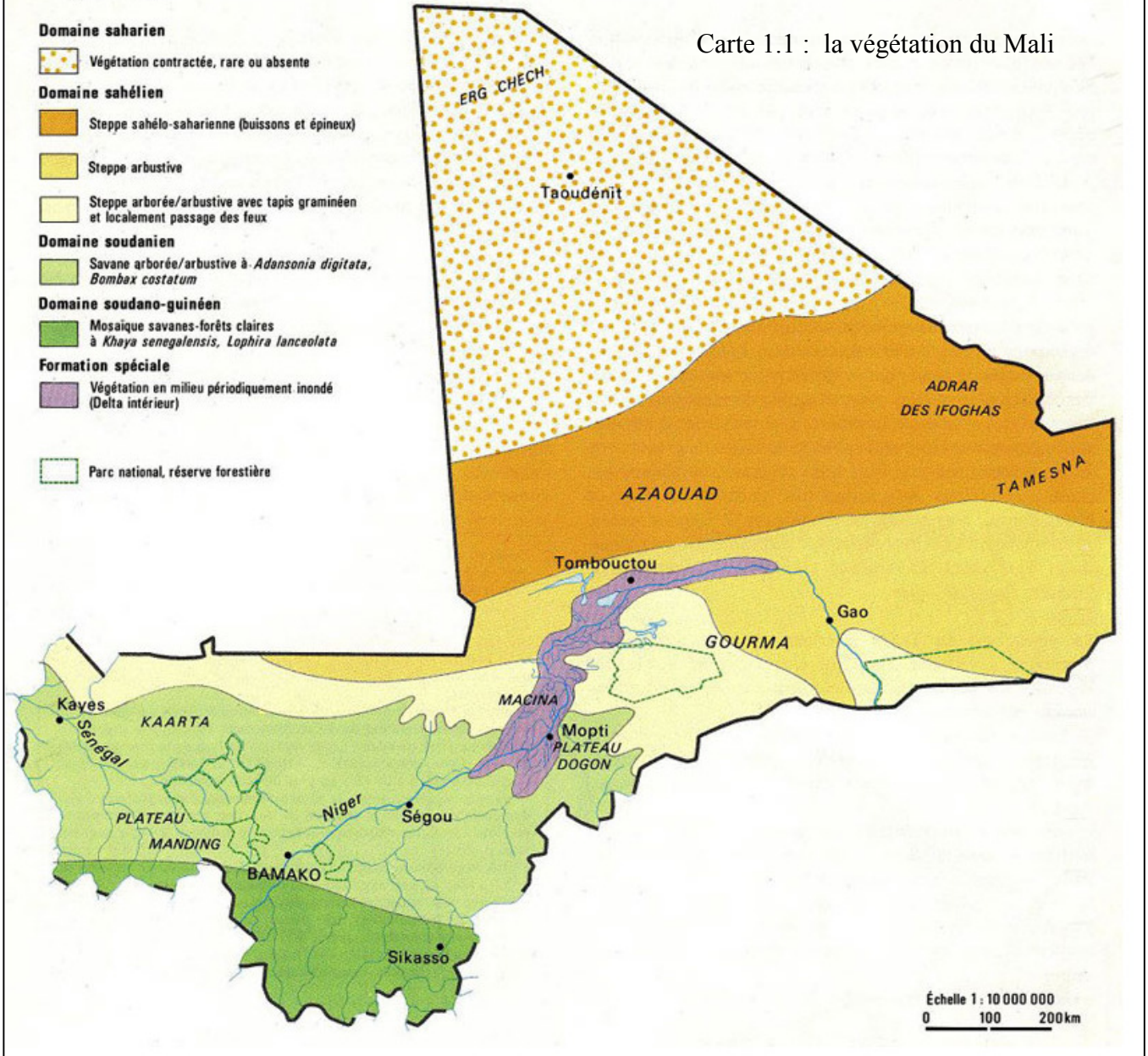
Domaine soudano-guinéen

 Mosaïque savanes-forêts claires à *Khaya senegalensis*, *Lophira lanceolata*

Formation spéciale

 Végétation en milieu périodiquement inondé (Delta intérieur)

 Parc national, réserve forestière




Carte 1.1 : la végétation du Mali


Source : Ministère de la Promotion des Investissements et des Petites et des Moyennes Entreprises


CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Régions climatiques

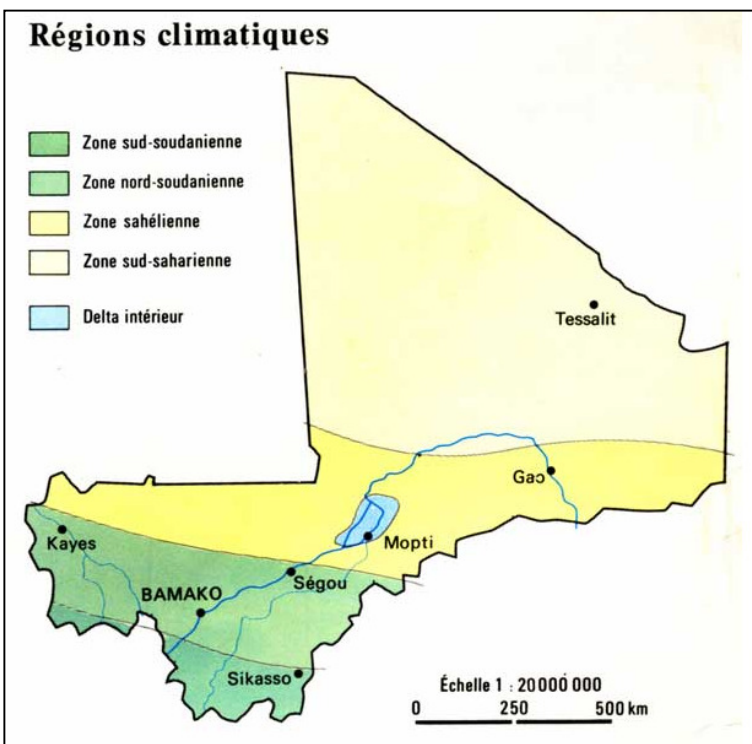
 Zone sud-soudanienne

 Zone nord-soudanienne

 Zone sahélienne

 Zone sud-saharienne

 Delta intérieur



Carte 1.2 :

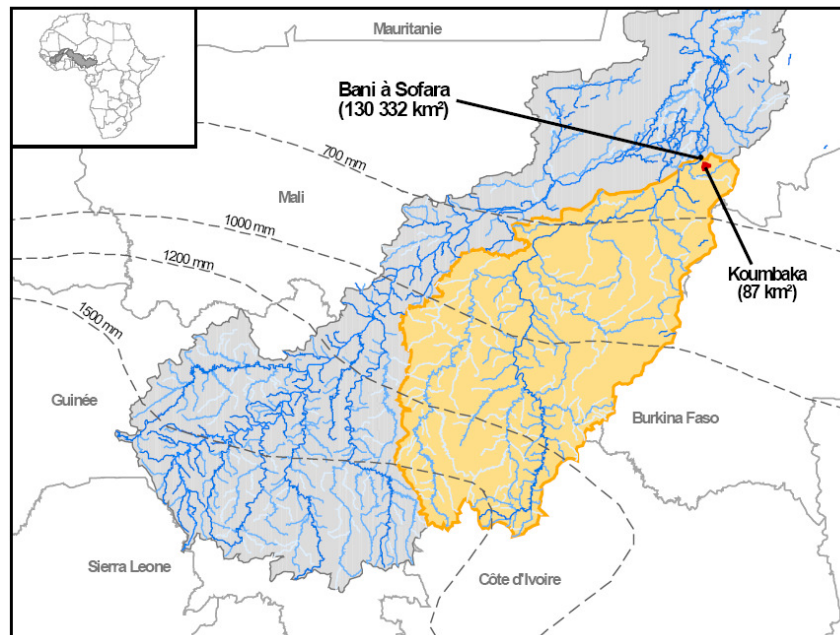
Les régions climatiques du Mali

Source : Ministère de la Promotion des Investissements et des Petites et des Moyennes Entreprises

2.3.2 Le bassin versant de Koumbaka

Le bassin versant de Koumbaka est un sous bassin du Bani, d'une superficie de 87 km². Il fait partie de la zone sahélienne.

Carte 1.3 : Situation du bassin versant de Koumbaka



Source : Fiche d'identité du programme RESSAC ANR.

On peut décrire ce bassin selon trois grandes unités géomorphologiques de l'amont vers l'aval.

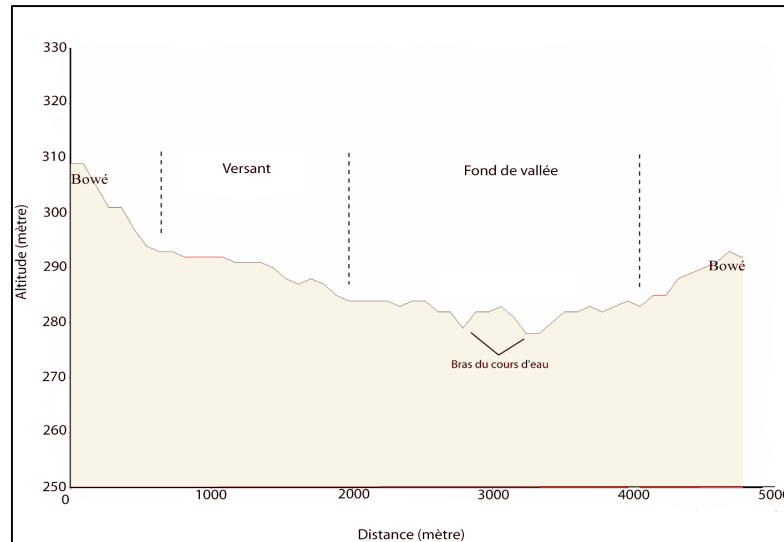
En amont, on est en présence d'une vaste étendue d'affleurement de grès parcourue par des diaclases. La végétation y est pauvre, cependant on peut observer quelques zones enherbées et une strate arborée qui colonise les zones de fracture.

De part et d'autre du fond de vallée s'élèvent des plateaux cuirassés, ou bowé. Les sommets sont essentiellement gravillonnaires et en plus faible quantité caillouteux. Le bord des plateaux est souligné par une steppe arbustive, le couvert herbacé est quasiment inexistant, des plaques d'herbes sont parsemées sur des sols nu gravillonnaire à terreux qui constituent les espaces séparant deux bowé successifs.

En aval, les fonds de vallée s'élargissent sur une plaine. La culture occupe la majeure partie de l'espace sauf pour une partie à l'Est marquée par la présence de steppe.

La topographie est faiblement marquée, elle est comprise entre 250 et 420 m d'altitude.

Carte 1.4 : Profil topographique du bassin versant de Koumbaka



✓ Les états de surface :

Casenave et Valentin se sont intéressés à l'influence des organisations superficielles sur le comportement des sols vis à vis de l'eau pour la zone sahélienne. Leur étude s'est faite in situ, à partir de surfaces de 1 m² soumises à des pluies simulées. L'objectif étant de mettre en évidence l'impact des caractéristiques physiques superficielles des sols et du couvert végétal sur l'hydrodynamique.

Ils définissent le terme *état de surface* à partir de la notion de *surface élémentaire* :

Une surface élémentaire désigne à un instant donné, un ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivant :

1. *Le couvert végétal*
2. *La surface du sol*
3. *Les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations, sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques.*

Un état de surface peut être défini par :

- 4. Une seule surface élémentaire,*
- 5. La juxtaposition de plusieurs,*
- 6. Un système de surfaces élémentaires, c'est à dire un ensemble au sein duquel jouent des interactions.*

Ils démontrent que l'hydrodynamique du milieu est conditionnée par les caractères d'états de surface ; ou les organisations pédologiques superficielles jouent un rôle prépondérant.

Lorsque l'on parle d'état de surface, on parle alors de l'organisation superficielle du sol qui est défini selon son impact sur l'hydrodynamique du milieu. Dans le cadre du stage l'échelle de travail sur imagerie satellitaire est supérieure au mètre carré. Les échelles d'observations sont de 10 m, 20 m, 30 m et 3 m. Il devient alors nécessaire de travailler directement à partir de l'état de surface sans passer par la surface élémentaire. L'état de surface est alors appréhendé dans ce travail comme un système de surfaces élémentaires.

Les relevés de terrains sont l'information à partir de laquelle a été construite l'interprétation des images. Ils rendent compte des états de surface suivant (Annexe 1) :

- Le bois
- La savane arbustive
- La steppe
- Les sols nus (naturels)
- La culture

On se focalisera à distinguer les surfaces caractérisées par la culture, les espaces naturels caractérisés par leur couvert végétal, et les espaces caractérisés par la topographie invariants dans le temps.

3 Documents et traitements utilisés

3.1 Les images

Toutes les images ont un même géoréférencement : UTM WGS 84, 30 Nord.

3.1.1 Les images Spot 1 et Spot 5

Spot est un satellite passif placé sur une orbite quasi-polaire, circulaire et héliocentrique.

Il se trouve à une altitude de 832 km et se déplace à une vitesse d'environ 25 00 km/h par rapport à la surface terrestre.

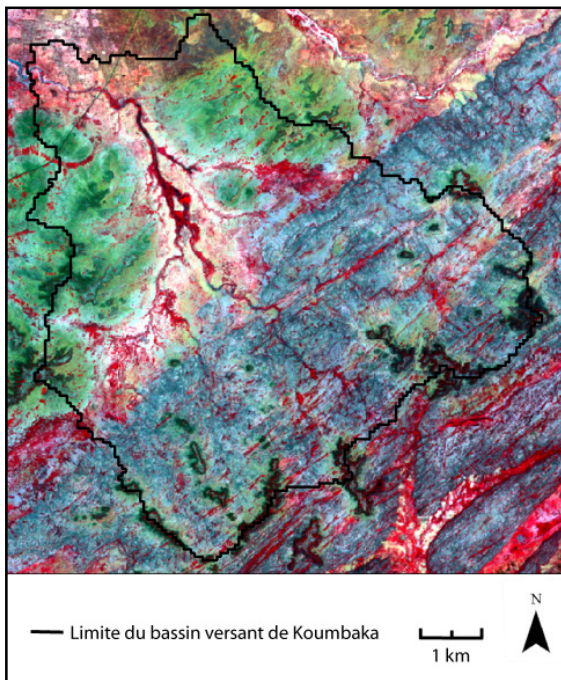
Ces caractéristiques lui permettent de balayer l'ensemble de la terre un peu plus de 14 fois par jour. Son cycle de révolution est de 26 jours.

L'angle d'observation du satellite peut aller jusqu'à + ou - 27° par rapport à la verticale du satellite.

Tableau 1.1 : Spécificités des images spot 1 et spot 5 utilisées.

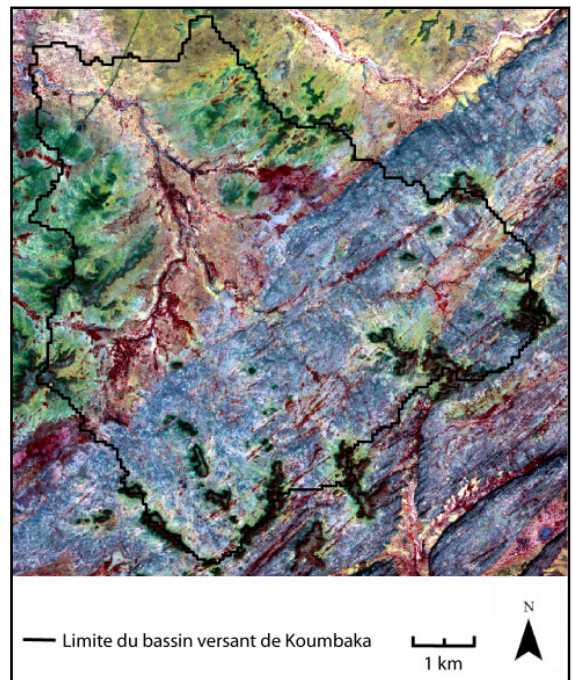
	Spectre électromagnétique	Bandes spectrales en μm	Résolution au sol
SPOT 1	Vert	<i>0,50 - 0,59</i>	<i>20 m</i>
	Rouge	<i>0,61 - 0,68</i>	<i>20 m</i>
	Proche Infra Rouge	<i>0,78 - 0,89</i>	<i>20 m</i>
SPOT 5	vert	<i>0,50 - 0,59</i>	<i>10 m</i>
	rouge	<i>0,61 - 0,68</i>	<i>10 m</i>
	PIR	<i>0,78 - 0,89</i>	<i>10 m</i>
	MIR	<i>1,58 - 1,75</i>	<i>10 m</i>

Image 1.1 : Image spot 1 et spot 5



Source : Spot Image

Cette image spot 1 à été prise le 24 septembre 1990, en fin de saison humide.



Source : Spot Image

Cette image spot 5 à été prise en décembre 2003, pendant la saison sèche.

3.1.2 L'image Landsat 5

Landsat est un satellite lancé par la NASA, spécifiquement destiné à l'observation de la Terre.

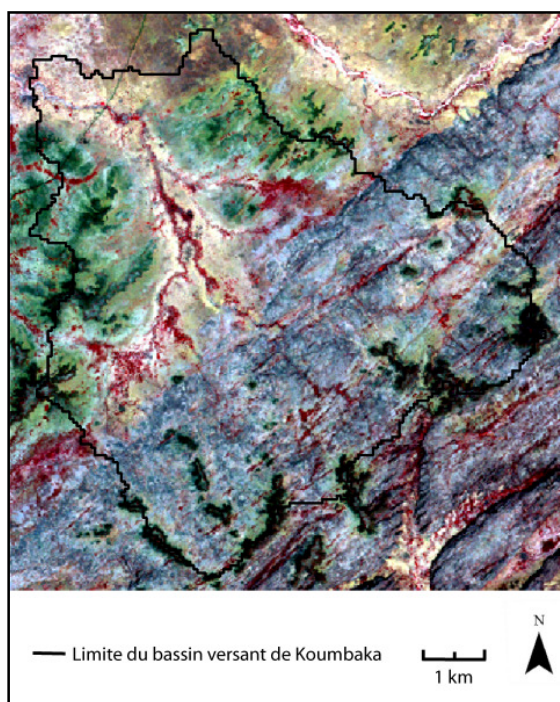
Le satellite landsat 5 a été lancé en 1982. Il est passif placé sur une orbite quasi-polaire, circulaire et héliocentrique. Il se trouve à une altitude de 705 km et balaye l'ensemble de la terre un peu plus de 14,5 fois par jour. Son cycle de révolution est de 16 jours.

Les images landsat 5 TM (Thematic Mapper) sont construites sur sept canaux, du bleu au moyen infrarouge. L'image utilisée dans cette étude ne contient que six canaux, elle ne contient pas d'information dans l'infrarouge thermique.

Tableau 1.2 : Spécificités de l'image landsat 5 utilisée

	Spectre électromagnétique	Bandes spectrales en μm	Résolution au sol
LANDSAT TM 5	Bleu	0,45 - 0,52	30 m
	Vert	0,52 - 0,6	30 m
	Rouge	0,63 - 0,89	30 m
	PIR	0,76 - 0,90	30 m
	MIR 1	1,55 - 1,75	30 m
	MIR 2	2,08 - 2,35	30 m

Image 1.2 : Image landsat 5

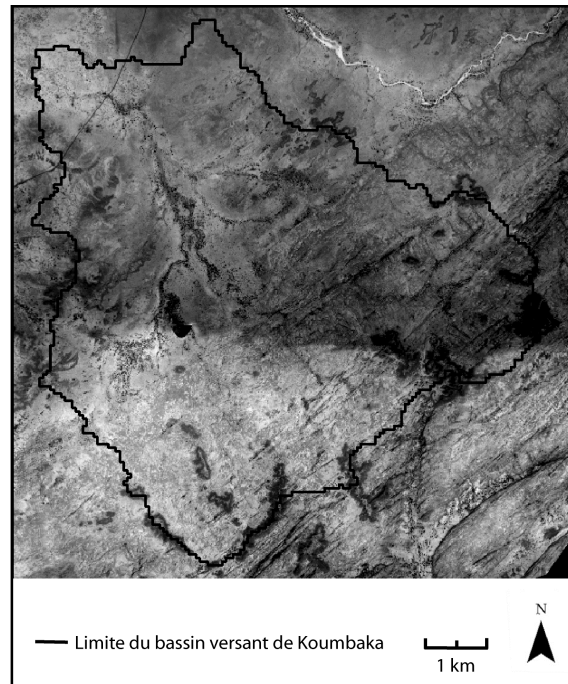


Source : Global Land Cover Facility, Université du Maryland

3.1.3 La photo aérienne

Image 1.3 : Photo aérienne

Cette photo aérienne est issue d'un mosaïque de quatre autres photos aériennes. Elle date de 1991, prise durant la saison sèche.

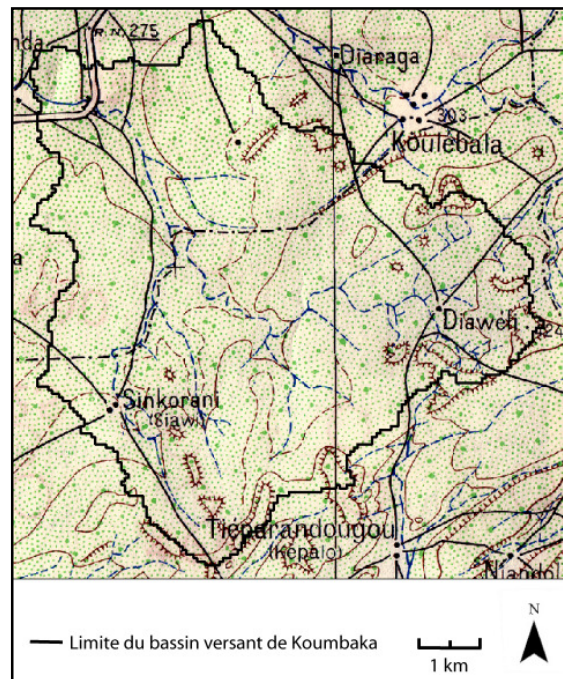


Source : Institut de géographie malien

3.1.4 La carte topographique

Image 1.5 : Carte topographique

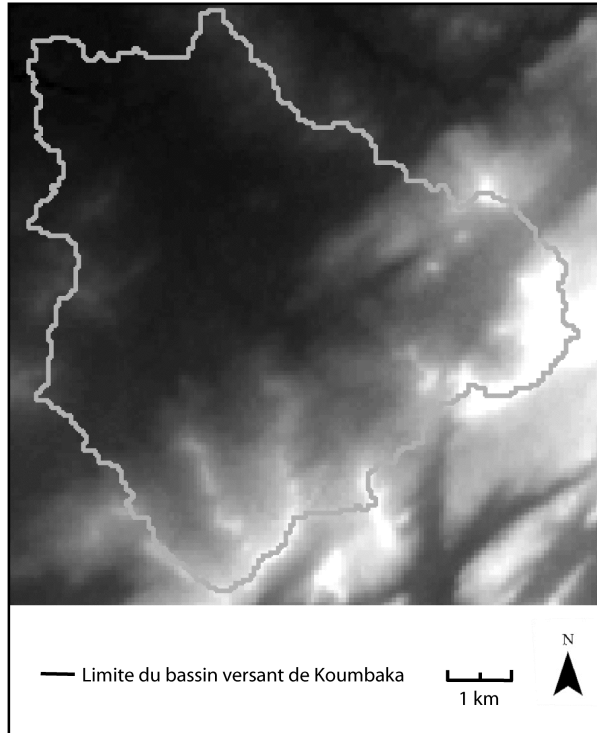
Cette carte topographique est la carte de San au 200/1000. Elle a été réalisée durant les années soixante par l'Institut Géographique Nationale.



Source : IGN

3.1.5 Le MNT SRTM

Image 1.6 : MNT SRTM



Source : Global Land Cover Facility, université du Maryland

Un modèle numérique de type SRTM ou Shuttle Radar Topography Mission est un fichier de données altimétriques recueillies par la navette spatiale Endeavour en février 2000 lors d'une seule mission. A une altitude de 233 km les données ont été acquises par interférométrie radar. Ces données sont distribuées par la NASA et la NGA.

Le MNT utilisé à une résolution de 90 m.

3.2 Les relevés de terrain

Les relevés de terrains ont été effectués par Denis Ruelland lors de deux missions en 2006. La première s'est déroulée du 8 au 15 mai et la seconde s'est déroulée du 13 au 16 novembre.

Les relevés de terrain se présentent sous la forme de points GPS accompagnés d'une fiche d'observation et de quatre photos comme éléments descriptif du milieu.

Les points GPS se présentent sous la forme d'un fichier de forme point, un fichier pour chacune des deux expéditions. Des points ont été pris «à la volé», ils ne sont pas

accompagnés d'une fiche d'observation, ils sont brièvement décrits dans la table attributaire du fichier.

Les fiches d'observations renseignent le milieu sur sa végétation, son sol, son relief, son anthropisation, avec d'éventuels commentaires (Annexe 2).

Les quatre photos apportent une précision visuelle, chaque cliché étant pris dans la direction d'un point cardinal.

Les sites d'observations ont été déterminés sur la base d'une classification non supervisée en dix sept classes, après une évaluation approximative du nombre de sols différents. Les points ont été définis de façon non aléatoire pour des problèmes de facilité de terrain. L'objectif de ces deux missions était de pointer les différents états de surface, de déterminer des parcelles surfaciques pour la réalisation de classifications supervisées pixel à pixel. Pour mon stage, où une recherche de limite nature-culture est importante, ce protocole apparaît limitant. En effet, la prise de points selon un transect le long de la limite nature-culture aurait apportée une information plus précise sur la nature et l'organisation des états de surface au niveau de cette limite.

3.3 Les pré-traitements sur les images

Tous les pré-traitements effectués sur les images ont été réalisés par Denis Ruelland. Toutes les images ont été géoréférencées à partir de l'image spot 5 afin d'obtenir une meilleure correspondance géographique entre les images.

Pour les besoins du travail mené, le MNT a été rééchantillonné à 30 m, sous le logiciel Arcgis par la technique de convolution cubique.

Le travail est réalisé sur une partie des images satellitaires, de la photo aérienne et de la carte topographique ; elles sont toutes redécoupées selon un même cadre légèrement plus grand que les limites du bassin versant de Koumbaka.

Chapitre 1 : Caractérisation des états de surface

4 Définition et préparation des éléments de travail

Les relevés de terrains ont été utilisés pour :

- L'apprentissage de la zone d'étude. En effet, les informations des fiches et des photos m'ont permis de décrypter les différents états de surface remarquables sur les images, et de définir une nomenclature de travail.
- La création d'un jeu de données d'apprentissage et de validation pour la réalisation de classifications automatiques.

4.1 Définition d'une nomenclature de travail

La manipulation des observations de terrain, m'a permis dans un premier temps de prendre connaissance du milieu d'étude. Les points GPS superposés aux images satellitaires et à la photo aérienne m'ont appris à lire ces images et à en reconnaître les différents états de surface.

Denis Ruelland avait commencé à réfléchir sur les différents types d'état de surface existants, en affectant à chaque point GPS relevés une classe thématique dite « temporaire ». Il m'a communiqué en complément des informations terrains, deux types de nomenclatures dont je me suis inspirée pour établir la nomenclature de travail.

La première nomenclature inspirée de la littérature, définit les états de surface à partir du type du couvert végétal et de son recouvrement. Elle distingue les sols nus avec moins de 10% de couvert végétal, les zones naturelles de la steppe dégradée aux bois et les zones de culture. Les types de couvert végétal et leur pourcentage de recouvrement sont des informations qualitatives et quantitatives communes à cette nomenclature et aux fiches descriptives de terrain.

La deuxième nomenclature est de type Corine Land Cover, que Denis Ruelland a adaptée à la zone d'étude. Ici, l'objectif est de trouver une hiérarchisation entre les différents types d'état de surface. Trois niveaux ont été établis, d'une description globale à une description plus fine, dont le premier niveau fait la distinction entre les zones sans végétation (sols nus naturels et constructions humaines) et les zones végétalisées (zones naturelles et zones de culture).

A partir de tous ces éléments j'ai établi la nomenclature de travail. Des contraintes et des règles ont accompagné mon travail.

Tout d'abord j'ai fait une sélection des relevés de terrain selon deux niveaux de réflexion, mais menés de façon conjointe :

- Tri des points GPS en fonction de leur descriptions quantitatives et qualitatives données par les fiches d'observation. Je leur ai affecté une classe en m'appuyant sur la nomenclature temporaire et la première nomenclature descriptive communiquée.
- Comparaison des points définis comme appartenant à une même classe thématique, puis comparaison des points dans leur globalité, toutes classes thématiques confondus, pour déterminer les plus représentatifs.

Les points ont aussi été sélectionnés en fonction de l'aptitude ou pas à distinguer sur imagerie chacun des différents types d'état de surface.

De toutes ces informations j'ai déterminé une nomenclature de travail, en 8 classes, décrite dans le tableau ci dessous :

Tableau 2.1 : Nomenclature de travail

Sol terreux : avec moins de 10% de couvert végétal.
Sol gravillonnaire : avec moins de 10% de couvert végétal.
Sol terreux/gravillonnaire : sol composé avec un pourcentage équivalent en gravier et terre, avec moins de 10% de couvert végétal.
Roche mère : affleurement de grès en plaque, avec moins de 10% de couvert végétal.
Steppe : formation herbacée continue d'une couverture de plus de 40%, avec ou sans arbres/buissons disséminés avec une couverture de leur canopée inférieure à 10%.
Savane arbustive : zones dominés par les arbrisseaux/buissons. La couverture de leur canopée est comprise entre 10 et 40%. Leur taille n'excède pas 2 m en hauteur et ils peuvent être caduques ou sempervirents. Le reste de la couverture concerne les sols nus et/ou des herbacées annuelles.
Forêt : zones avec des arbres/arbustes dont la canopée a une surface supérieure à 40%, une strate herbacée et/ou buissonnante assez couvrante. Les arbres font plus de 2 m de haut et peuvent être caduques ou sempervirents.
Culture : toutes surfaces cultivées, irrigation naturelle ou non, avec ou sans arbres.

Cette nomenclature est donc construite à partir des critères caractéristiques des différents types d'états de surface, déterminés lors d'études menées pour le milieu sahélien, et en fonction des possibilités de distinction des différents états de surface au regard des images satellitaires et de la photo aérienne de travail.

4.2 Construction d'un jeu de données de travail et de validation

A partir de cette nomenclature, j'ai construit un jeu de données de travail et de validation, utiles aux classifications automatiques.

Ces données sont représentées par une couche vecteur sous forme de polygones. A partir d'une superposition de toutes les images, SPOT 5, SPOT 1, Landsat 5 et photo aérienne, j'ai tracé des polygones de surface variable de telle sorte que pour chacune des images une même classe thématique soit représentée.

Pour représenter au mieux la réalité terrain, c'est à dire l'occupation relative de chaque états de surface sur le bassin versant ; j'ai utilisé une plus grande proportion d'éléments représentatifs des classes « culture » et « roche mère » et une proportion moindre pour les éléments représentatifs des autres classes. Pour chaque classe, 60% des échantillons en superficie sont utilisés comme éléments d'apprentissage et les 40% restant sont utilisés comme éléments de validation. La totalité des échantillons représentent 1% de la surface totale du bassin versant de Koumbaka.

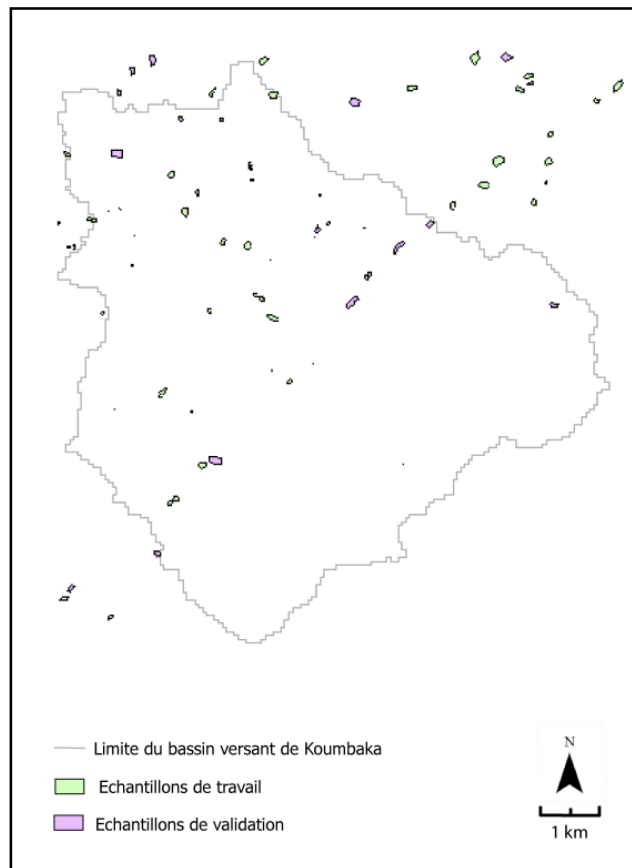
La question du rapport à l'échelle d'observation se pose ici. Les images traitées ont des résolutions différentes : 3 m, 10 m, 20 m et 30 m.

Pour répondre à ce point méthodologique discutable, rappelons que l'objectif du stage n'est pas de faire une cartographie des états de surface le plus précisément possible, mais de déterminer une caractérisation des états de surface à partir de documents multisource et de se pencher particulièrement sur la transition entre l'espace de culture et l'espace naturel.

On cherche alors dans le cadre de ce stage à mettre en évidence les apports de différentes méthodes d'extraction de l'information.

Je n'ai donc pas ré-échantillonné les images à une résolution plus grossière de 30m. Chaque polygone associé à l'une des huit classes déterminées par la nomenclature de travail est représentatif, pour toutes les images, d'une surface « homogène » thématiquement.

Carte 2.1 : Echantillons de travail et de validation



5 La cartographie de référence par photo-interprétation

La comparaison de cartographies indépendantes de différentes images d'une même date détermine, le potentiel d'analyse des états de surface pour chacun des formats.

Utiliser une carte comme référence à partir de laquelle seront faites les comparaisons permet, en plus de déterminer le potentiel d'analyse de l'évolution.

Pour pouvoir justifier d'une éventuelle évolution la cartographie de référence sera faite le plus précisément possible, dans le sens où les éléments représentés seront au plus proche de la vérité terrain, de l'existant. Ce document de référence sera alors élaboré à partir de l'image satellitaire la plus récente, l'image SPOT 5 prise en 2003, aidés des relevés de terrain pris en 2006 pour l'identification des divers états de surface présents.

Les trois années qui séparent la date de prise de l'image spot 5 et la date de la campagne des relevés des points GPS pour la réalisation cartographique ne constituent pas une faiblesse méthodologique. Les relevés de terrain sur lesquels je me suis appuyée pour identifier les différents états de surface, ont été pris au cœur d'espaces assez grands et homogènes et non proche de limite entre différents milieux. Sur trois années, les changements ne sont pas assez importants pour que les milieux pointés par les relevés GPS aient changé d'état de surface.

Pour l'intérêt de l'étude, on retiendra les surfaces associées à la géomorphologie du terrain qui ont comme spécificités d'être invariantes dans le temps. En les considérant comme un élément unique on s'affranchit ainsi d'une étude détaillée à leur égard, inutile à la problématique du stage. Pour le bassin versant de Koumbaka on distingue de grandes étendues de roche-mère, du grès, recouvertes par endroit et par plaque, d'un sol herbacé plus ou moins fourni selon les saisons. On observe aussi l'existence de plateaux cuirassés ou bowé (bowal au singulier), constitué d'un sol nu gravillonnaire avec un bandeau de savane arbustive à la limite du plateau et de ses versants. Ces espaces ne sont pas variables à notre échelle de temps d'étude et humaine. Ils sont alors posés comme éléments acquis, dans le temps, pour notre interprétation.

La méthodologie utilisée pour réaliser cette carte de référence est la photo-interprétation manuelle. Ce procédé fait appel au cerveau humain pour distinguer et analyser l'information perçue par l'œil. L'objectif est de mettre en correspondance les données terrain ou expertes avec les données images pour mettre en évidence les objets recherchés.

La photo-interprétation de l'image SPOT 5 est construite sur quatre plans thématiques :

- Les voies de communications
- L'habitat
- L'hydrographie
- Les états de surface

La localisation de l'habitat et des voies de communication avait comme objectif d'intégrer cette information anthropique spatialisée à l'analyse de la pression anthropique sur le bassin versant. En effet, l'idée était d'inclure une relation de distance à ces éléments pour tenter de

caractériser l'évolution spatiale de l'espace cultivé. Par manque de temps, cette idée ne sera pas abordée.

Le capteur de l'image SPOT 5 a une résolution de 10 m. Les logiciels traditionnels de cartographie permettent une observation des images à différentes échelles. Pour une résolution de 10 m les limites raisonnables d'observation se situent entre 1/15000 et 1/25000. L'ensemble de la photo-interprétation sera réalisé à une échelle équivalente de 1/20000.

- Les voies de communications :

Les voies de communication sont des chemins de terre ou pistes. Il existe une seule route goudronnée en aval du bassin, dans la plaine. La distinction des types d'axes de communication n'est pas nécessaire à l'objet de l'étude, aucune distinction ne sera alors faite entre la route goudronnée et les pistes.

Les pistes sont nombreuses sur l'espace agricole et relient les villages entre eux. Seuls les grands axes pour les zones naturelles ont été retenus alors que pour la zone de culture un plus grand nombre des pistes ont été photo interprétés.

La distinction des voies de communication sur l'image satellitaire SPOT 5 n'est pas évidente. En effet, les pistes sont d'une largeur inférieure à la résolution du capteur (10 m) et peuvent se confondre parfois avec son environnement de même nature, par exemple il est difficile de bien distinguer une piste en terre située au milieu d'un sol nu terreux. Pour pallier à cette limite de l'image SPOT 5, l'utilisation en parallèle de la photo aérienne et de la carte topographique a été nécessaire à l'interprétation de ce plan thématique.

- L'habitat :

L'habitat est constitué dans ce cas d'étude par des villages dispersés sur le territoire. Ils se localisent sans exception en pleine zone de culture, un village est toujours entouré de parcelle agricole. Pour les mêmes raisons que celles citées pour le plan thématique précédent, l'utilisation en parallèle de la photo aérienne et de la carte topographique a été nécessaire.

- L'hydrographie :

Comme pour le plan voies de communication, aucune distinction de hiérarchie dans la représentation du réseau hydrographique ne sera suivie. Seuls les drains principaux sont photo-interprétés. Le cours d'eau se perd sous les arbres et ses diverses sinuosités sont observables par la présence de « forêt galerie ». Ce pendant, quelques aller retour sur la photo aérienne et la carte topographique ont été nécessaires pour effectuer des vérifications.

- Les états de surface :

Les unités cartographiques utiles à la problématique de l'étude sont définies à partir de la nomenclature de travail élaborée lors de l'analyse des relevés de terrain (tableau 2.2).

Les critères établis pour la réalisation de ce plan thématique sont :

- ✓ Mettre en évidence les grands ensembles définissant les divers états de surface présents.
- ✓ Inclure dans la caractérisation du territoire les ensembles géomorphologiques invariants dans le temps. Ici ces éléments sont représentés par les bowé et les affleurements de roche mère (grès).
- ✓ Identifier l'espace de transition, ou de variation, entre la zone de culture et la zone de nature.

Il a paru suffisant d'établir une typologie en 7 classes pour l'étude de l'image SPOT 5 en réponse à notre problématique.

Les sols « gravillonnaires, terreux et gravillonnaire/terreux » distingués par la nomenclature de travail sont regroupés sous une même unité cartographique car ils font partie d'un même ensemble géographique. Les autres éléments de la nomenclature de travail constituent une unité cartographique.

Les bowé ont été sélectionnés pour définir une nouvelle unité cartographique. Cette structure géomorphologique est acceptable dans cette typologie car elle est homogène dans sa constitution d'un élément à l'autre et dans le temps.

Tableau 2.2 : Passage de la nomenclature de travail à la typologie de la photo-interprétation

Nomenclature de travail	Typologie de la photo interprétation
Roche mère	Roche mère
Sol gravillonnaire	Sol nu avec moins de 10% de végétation
Sol gravillonnaire-terreux	
Sol terreux	Culture
Culture	
Bois	Bois
Savane arbustive	Savane arbustive
Steppe	Steppe
	Bowé

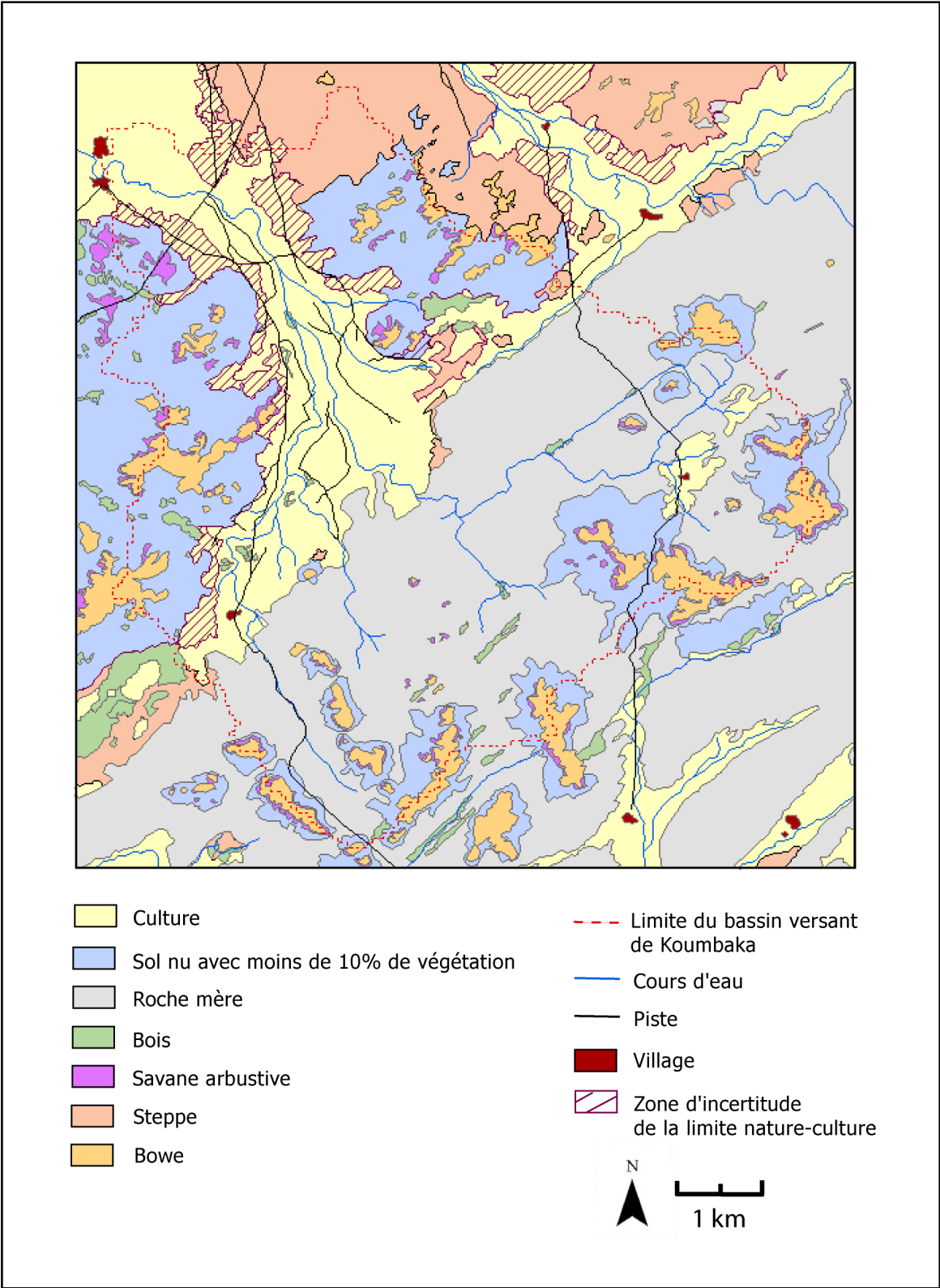
En ce qui concerne l'expression de la limite entre la zone de culture et la zone de nature des problèmes se sont posés. En effet, cette limite ne peut pas être définie de façon générale comme une ligne bien distincte, frontière des deux milieux qu'elle sépare.

L'extension des terres de culture sur les versants du bassin versant ne se fait pas de façon homogène sur tout le territoire. Par endroit des formes géométriques représentatives de parcelles agricoles se dispersent et morcellent l'espace naturel qui jouxte l'espace de culture. Ailleurs, l'extension se fait de façon plus diffuse ou les deux milieux se mélangent.

Cette limite existe physiquement, mais elle est difficile à lire sur les images. Cette difficulté est accrue lorsque l'on étudie une image prise en saison sèche. Un sol nu d'une parcelle agricole avec des résidus de culture peut se confondre radiométriquement avec une steppe herbeuse sèche.

Cette limite est alors représentée par une zone aux endroits où le tracé d'une ligne n'était pas réalisable. L'espace qui représente l'unité cartographique « culture » a été tracé jusqu'à la limite certaine de l'unité cartographique adjacente, de telle sorte qu'elle englobe la zone d'incertitude où se trouve la limite nature-culture.

Carte 2.2 : Cartographie de référence du bassin versant de Koumbaka par photo-interprétation



6 Choix des canaux et des néocanaux

La littérature fait état de diverses combinaisons de canaux ou indices construits sur les propriétés optiques des éléments. Ces indices peuvent être appliqués à toutes images satellitaires, tant est qu'ils répondent aux besoins de l'étude par l'information qu'ils mettent en évidence. Dans ce stage, le recours à des néo canaux a pour objectif de trouver un moyen de discriminer au mieux les différents états de surface des images les uns par rapport aux autres ; et non de déterminer une valeur caractéristique pour chacun d'entre eux. La combinaison de canaux sur images en compte numérique sans passer par une transformation en valeur de réflectance est alors acceptable.

Ils seront testés à partir de classifications supervisées et gardés comme canaux de travail si leur pouvoir discriminatoire est plus important que les canaux bruts des images.

6.1 L'indice de végétation normalisé ou NDVI.

L'indice de végétation met en évidence le couvert végétal et plus précisément l'activité chlorophyllienne. Son principe repose sur les propriétés optiques de la chlorophylle (pigment foliaire), qui présente un pic d'absorption dans le rouge et une réflectance importante dans le proche infra rouge (GUYOT, 1992).

Le Ndvi est une expression numérique déterminée à partir de la combinaison des bandes spectrales rouge et proche infrarouge des images, tel que :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$

Avec PIR : la réflectance dans le proche infra rouge

R : la réflectance dans le rouge

Cet indice est utilisé à diverses fins, que ce soit pour déterminer un type de couvert végétal chlorophyllien, et son évolution ou que ce soit pour déterminer des caractéristiques biologiques plus précises comme l'évapotranspiration, les effets de stress, le calcul de la biomasse... Différents types d'indices de végétation ont été établis afin de diminuer les effets atmosphériques, la contribution des effets spectraux du sol et autres effets du par les variations angulaires des différents capteurs satellitaires.

Pour le travail mené l'indice de végétation est utilisé en vue de mettre en évidence la végétation chlorophyllienne dans un seul but de discrimination des différents états de surface.

6.2 L'indice de brillance ou IB.

L'indice de brillance met en évidence les sols, il est très utilisé pour la pédologie. Par sa formule il est équivalent au calcul de l'albédo sur un intervalle de longueur d'onde restreint (GIRARD et GIRARD, 1999), c'est à dire équivalent au calcul du rapport entre l'énergie solaire réfléchié par une surface sur l'énergie solaire reçue par cette même surface. Les surfaces très réfléchissantes ou « brillantes » sont mises en évidence.

Même si les minéraux ont chacun une réponse spectrale propre, d'une manière générale les roches sont caractérisées par un spectre continu et croissant du visible au proche infra rouge (GUYOT, 1992) avec une valeur de réflectance dans le rouge supérieure à celle de la végétation.

L'indice de brillance est une expression numérique déterminée à partir de la combinaison des bandes spectrales rouge et proche infrarouge des images, tel que :

$$IB = \sqrt{(PIR^2 + R^2)}$$

Avec PIR : la réflectance dans le proche infra rouge

R : la réflectance dans le rouge

De même que pour l'indice de végétation, l'indice de brillance est utilisé en vue de mettre en évidence les sols nus.

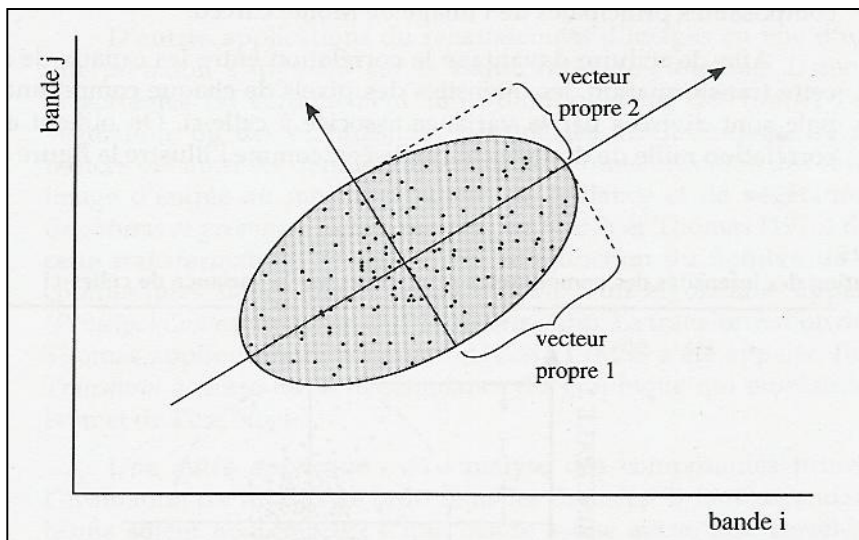
6.3 L'analyse en composante principale

L'analyse en composante principale est une technique d'amélioration de la qualité des images pour mettre en évidence les objets recherchés.

Cette technique permet de réduire la visualisation de l'information sur un nombre de trois variables avec un minimum de perte par rapport à l'information de départ. En effet, la visualisation sur écran des images se fait par l'intermédiaire de trois canaux alors que l'information image est très souvent définie par plusieurs variables (images satellitaires de plus de trois bandes spectrales, ou superposition de canaux ou néo canaux).

Cette méthode s'appuie sur une transformation orthogonale de l'information, la transformée de Hotelling (figure1). En posant l'hypothèse que la représentation de l'information d'une image selon toutes les n variables ou composantes images est un nuage de points proche de l'ellipsoïde, il est alors possible d'induire une rotation des axes des composantes images pour définir un nouveau repère de représentation. Les nouveaux axes ainsi obtenus sont les composantes principales (F.BONN et G.ROCHON, 1993).

Figure2.1 : Ellipsoïde de distribution des données dans un espace à deux dimensions



Source : F. BONN et G. ROCHON, Précis de télédétection.

Les vecteurs propres 1 et 2 définissent les nouvelles composantes 1 et 2.

De plus, cette technique décorrèle l'information contenue dans les images. Les nouvelles composantes principales contiennent le maximum de variance des données en entrées. L'importance de la variance est maximale pour la composante principale 1 et diminue à chaque fois pour toutes les autres composantes principales suivantes. D'une manière générale, les trois premières composantes principales, représentent à elles seules 98 à 99% de l'information de départ décorréllée.

Cependant, le recours à une analyse en composantes principales n'est pas une technique solide dans sa reproductivité. En effet, les nouveaux axes sont créés à partir d'une rotation des composantes images sur le nuage de points que forment les données d'entrée. Cela signifie que les vecteurs propres (à l'origine des composantes principales) sont sensibles aux valeurs des données d'entrées. Si l'image d'entrée contient des éléments radiométriquement « perturbateurs », comme la présence de nuages, de neige ou d'une grande étendue d'eau, le nuage de points sera déformé par la présence de valeurs radiométriques extrêmes. Si l'étude menée se focalise sur les éléments autres que les éléments dits « perturbateurs » alors le recours à l'analyse en composantes principales n'est pas pertinente.

Dans le cas présenté ici, aucune image satellitaire ne présente des éléments qui pourraient rendre discutable le recours aux composantes principales pour l'analyse des états de surface. Cette technique sera utilisée pour éliminer l'information redondante des images et trouver une meilleure discrimination des états de surface grâce à la variance portée par les composantes principales.

6.4 Combinaison des canaux pour les applications automatiques

L'objectif de cette étape est de déterminer, à partir des échantillons de travail, la combinaison de canaux et de néo canaux la plus discriminante pour réaliser les classifications automatiques pixel à pixel et orienté objet. Une combinaison entre canaux bruts et néo canaux sera déterminée pour chacune des images. La démarche d'analyse sera développée pour un seul exemple, pour l'image spot 5. Les résultats intermédiaires pour les autres images sont mis en annexe (Annexe n°3 et 4).

Il est important de rappeler que pour un souci de comparaison avec la cartographie de référence, les classifications automatiques seront construites à partir de la même typologie que celle établie par photo-interprétation. L'analyse est alors faite à partir de la nomenclature de travail et les classifications seront le résultat de regroupement (cf tableau 2.2).

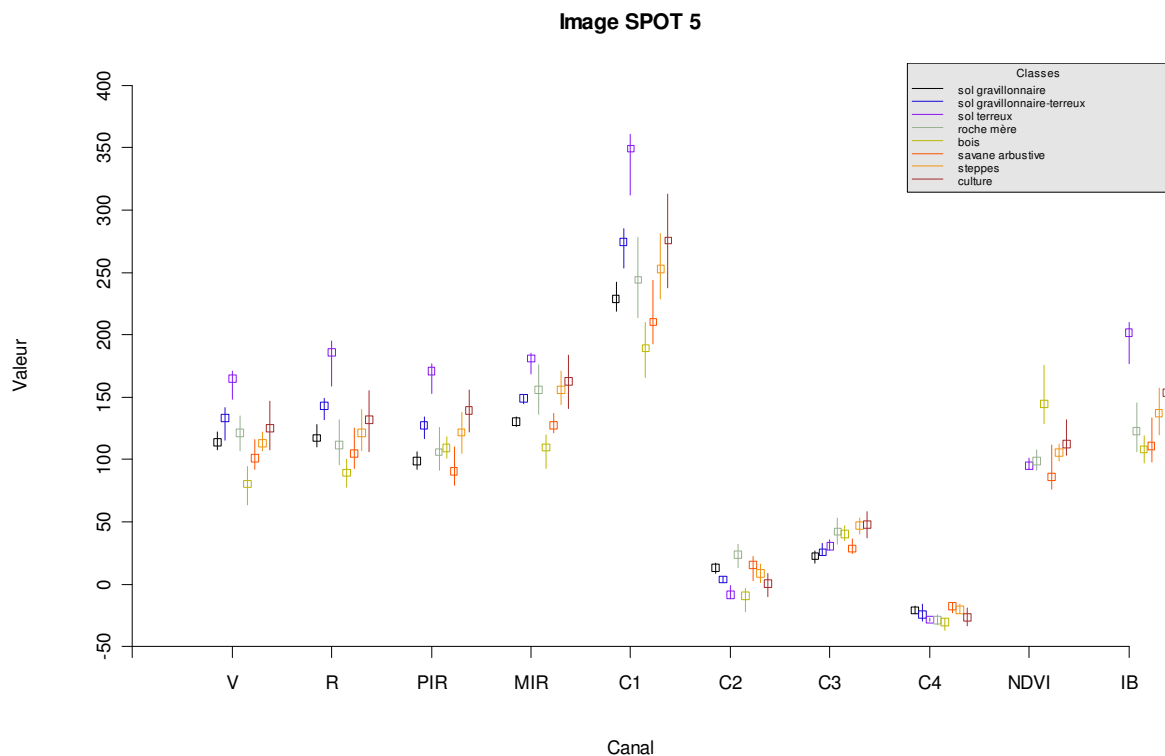
La méthodologie d'analyse est construite sur trois étapes :

- Visualisation des valeurs moyennes pour chaque classe de la nomenclature de travail dans chacun des canaux et néo canaux.
- Représentation des valeurs moyennes des échantillons de travail sur des graphiques bidimensionnels
- Détermination et validation d'une combinaison de canaux et de néocanaux de travail par classification supervisée.

L'image spot 5 comme exemple méthodologique.

Une représentation des valeurs moyennes pour les différentes classes donne un aperçu des confusions possibles (graphique 2.1).

Graphique 2.1 : Valeur moyenne en compte numérique pour l'image spot 5



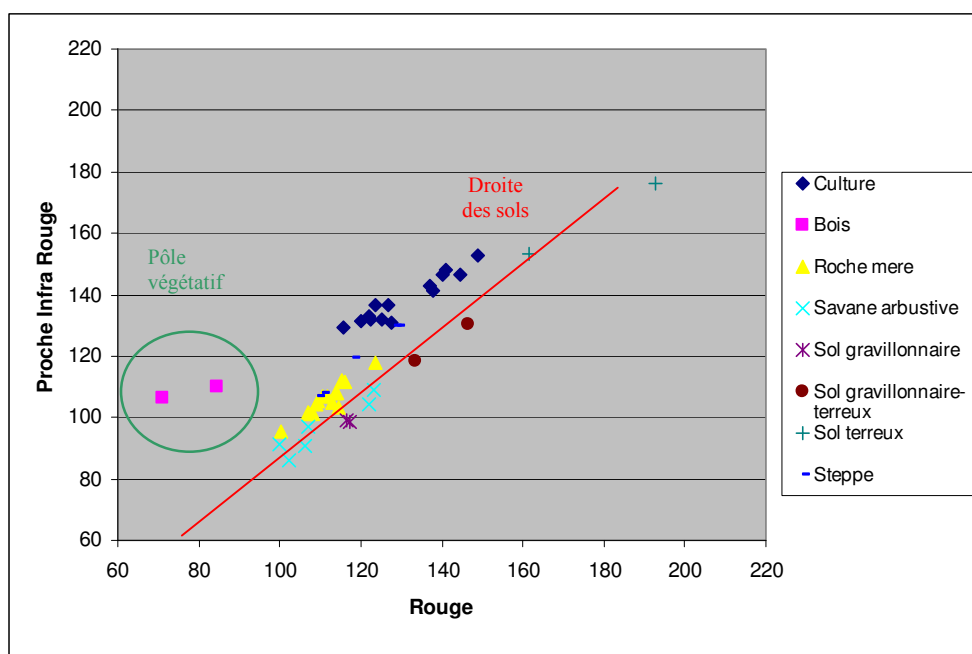
Les valeurs représentées sont des valeurs moyennes avec un intervalle de confiance à 95%. En observant ce graphique, on se rend compte qu'une discrimination parfaite entre chacune des classes n'est pas possible. La confusion qui existe entre la classe « culture » et « steppe » est commune à chaque canal.

Le choix entre les différents canaux va alors se faire en fonction de leur information physique et de leur pouvoir discriminatoire. Pour ce faire, on utilise une représentation bidimensionnelle de chaque échantillon de travail.

➤ L'information physique :

Les caractéristiques optiques des roches et des végétaux s'expriment dans le rouge et le proche infra rouge. En effet, du rouge au proche infra rouge les roches ont une réflectance croissante alors que les végétaux sont caractérisés par un pic d'absorption dans le rouge et un pic d'émission dans le proche infra rouge. Ces caractéristiques peuvent être visibles sous forme d'un graphique bidimensionnel (graphique 2).

Graphique 2.2 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux PIR et R.



Chaque type de roches s'alignent selon une droite en fonction de leur réflectance, c'est la droite des sols. Théoriquement cette droite passe par les origines des axes. Sur le graphique la droite est une représentation de l'ensemble des droites spécifiques à chaque sol. C'est à titre indicatif, pour visualiser l'organisation des différents états de surface présents. Cette droite ne passe pas par l'origine, ce décalage est dû aux effets perturbateurs rencontrés dans l'atmosphère et au fait que l'on soit en compte numérique. Regroupés autour de cette droite on peut observer les sols nus.

Les végétaux se regroupent le long de l'axe des ordonnées puisque leur réflectance est faible dans le rouge. C'est le pôle végétatif. Ce pôle se déplace du « haut vers le bas » en fonction de

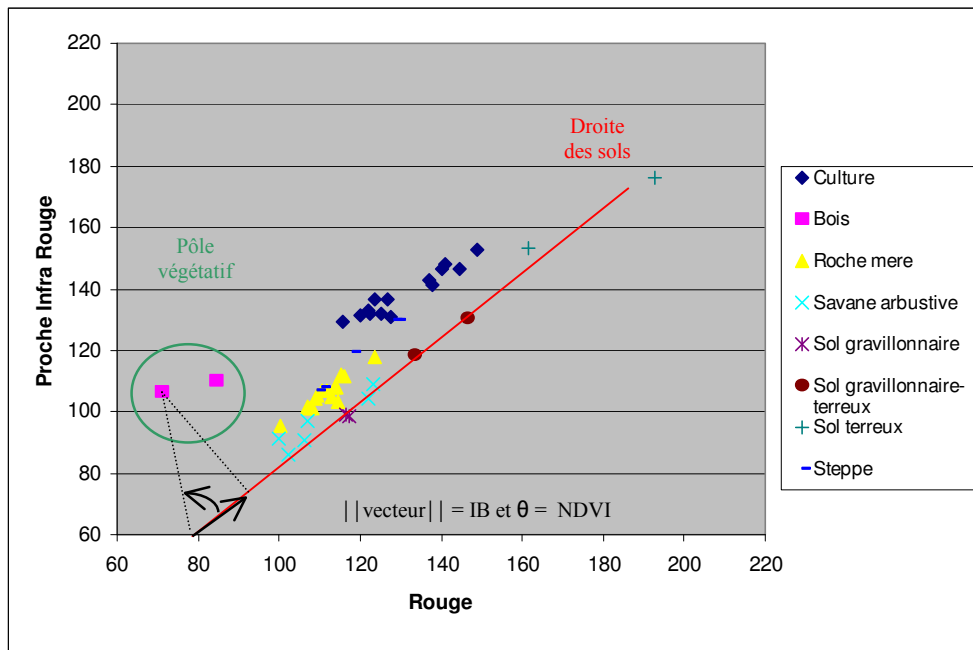
l'activité chlorophyllienne de la végétation. Ce pôle regroupe alors les végétations denses et très actives.

Entre ces deux éléments s'organisent les divers états de surfaces qui sont composés d'un mélange de sol nu et de végétation. D'une manière générale on peut dire que les états de surfaces présents sont fortement sous l'influence de leur sol. Cela est dû à la présence d'une végétation claire (savane arbustive) ou répartie par plaque (steppe) et peu active car l'image spot 5 est prise en saison sèche.

La combinaison de ces deux canaux sera conservée, malgré les confusions visibles car elle est révélatrice d'une information physique du territoire d'étude.

L'indice de brillance IB et l'indice de végétation NDVI ont comme but de mettre en évidence respectivement la réflectance des sols et l'activité des végétaux. Par construction ils sont tous les deux le produit d'une combinaison entre le canal rouge et le canal proche infra rouge. Ils ont la même valeur informative que l'information portée par les canaux rouge et proche infra rouge brutes. En effet, représenter les classes dans un diagramme bidimensionnel à partir du NDVI et de l'IB revient à représenter l'information du diagramme rouge-proche infra rouge en opérant un changement de repère (graphique 2.3).

Graphique 2.3 : Expression du NDVI et de l'IB en fonction des canaux rouge et proche infra rouge

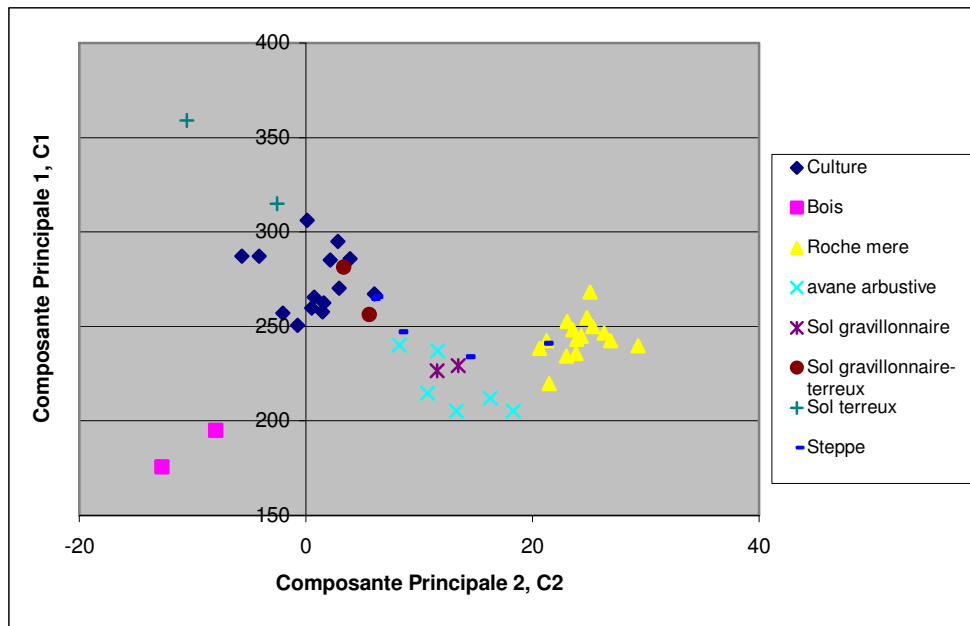


Le choix d'une combinaison de canaux de travail sera fait alors à partir couple PIR-R ou NDVI-IB, pour éviter une redondance de l'information.

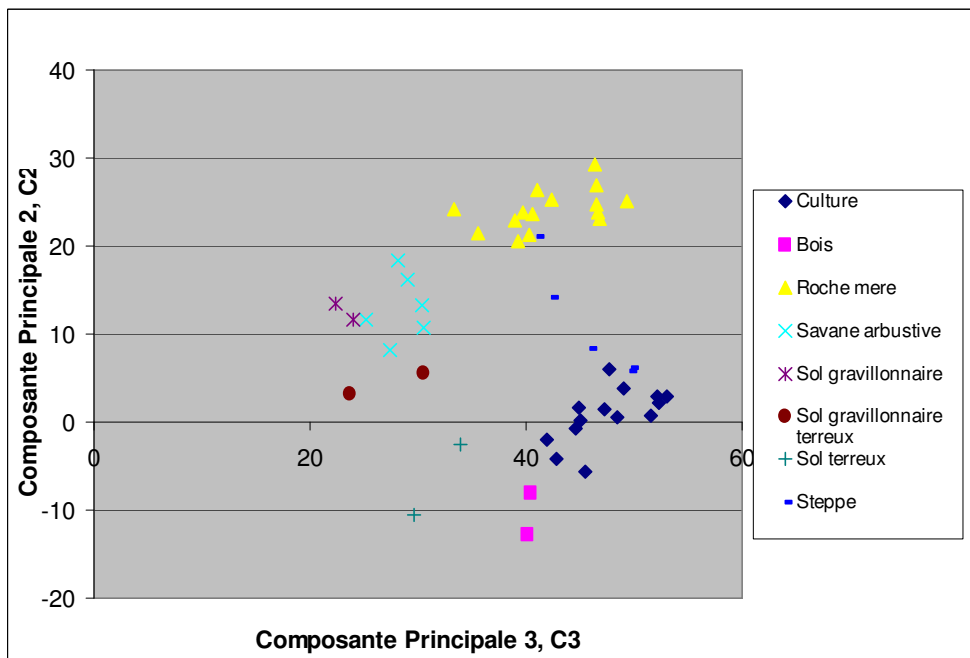
➤ Le pouvoir discriminatoire des canaux :

Malgré l'instabilité de l'information que donne l'analyse en composantes principales, elle a l'avantage de donner une information décorrélée (graphique 2.3 et 2.4).

Graphique 2.3 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux C1 et C2



Graphique 2.4 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux C2 et C3

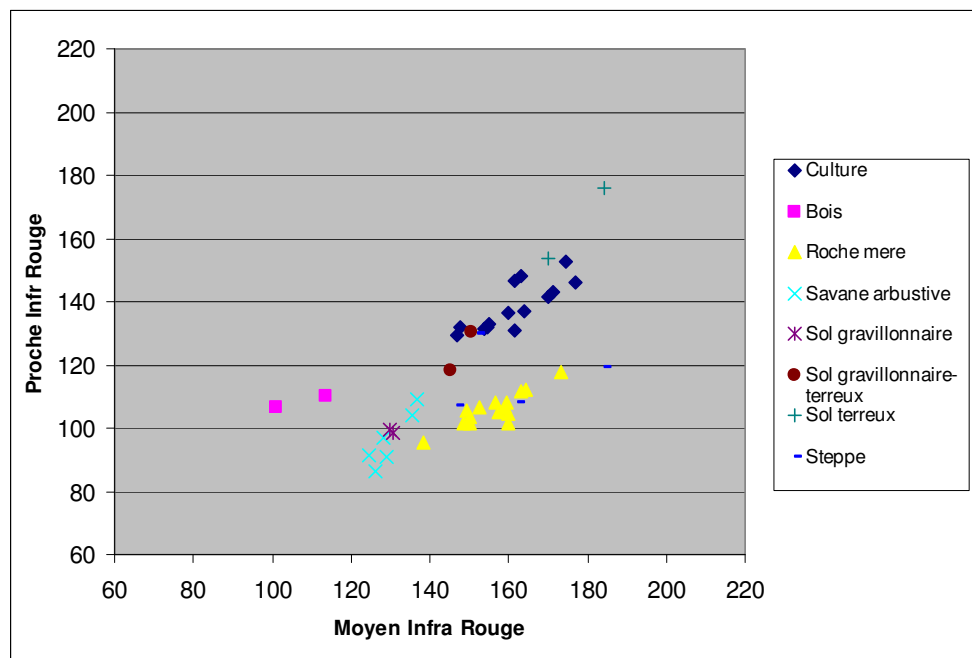


Les trois premières composantes, celles qui contiennent 98 à 99% de l'information de l'image originale, seront utilisées pour la combinaison des canaux de travail.

Le canal vert est très corrélé au canal rouge. Il ne sera pas conservé pour constituer un canal de travail.

L'information dans le moyen infra rouge ne paraît pas apporter une information discriminative supplémentaire par rapport à l'information supportée par les canaux rouge et proche infra rouge.

Graphique 2.5 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux PIR et MIR.



Cependant le canal moyen infra rouge sera testé dans les classifications, pour juger de la pertinence de ce canal par rapport aux autres.

Les combinaisons envisagées sont alors :

$$C1+C2+C3+PIR+R$$

$$C1+C2+C3+NDVI+IB$$

Si le MIR apporte une information discriminante supplémentaire, ce canal sera gardé et ajouté à l'une des deux combinaisons. Pour valider ces combinaisons, des classifications supervisées ont été faites puis validées par une matrice de confusion.

Les combinaisons de travail établies pour chacune des images satellitaires sont :

Image satellitaire	Combinaison
Spot 5	C1+C2+C3+NDVI+IB
Spot 1	C1+C2+C3+R+PIR
Landsat 5	C1+C2+C3+NDVI+IB

Autant pour l'image Spot 5 que pour l'image Landsat 5, les canaux du Moyen Infra Rouge n'apportent pas une information supplémentaire discriminative. Ces combinaisons respectives seront donc utilisées pour les classifications automatiques et la photo aérienne sera traitée sur son seul canal.

7 Les classifications

Une classification segmente l'image en vue de lui donner une signification thématique. En effet, le but d'une classification est de *regrouper des ensembles de pixels similaires en classe* (ROBIN, 1998).

Pour cette étude la similarité entre pixel ne sera abordée que d'un point de vue radiométrique, à partir des échantillons de travail.

Les classifications automatiques appliquées à l'ensemble des images de travail ont pour objectif de déterminer le pouvoir discriminant des différents formats en ce qui concerne la caractérisation des états de surface et de la limite entre l'espace de culture et l'espace naturel. Pour cela on fera une comparaison entre les différentes classifications et la cartographie de référence. La typologie utilisée dans les traitements automatiques, rappelons-le, sera donc celle établie par la photo interprétation (tableau 2.2).

Un masque sera appliqué sur toutes les images pour extraire les bowé, car ces derniers sont des structures géomorphologiques stables dans le temps. Cela permet en plus, de réduire les possibilités de confusions. L'analyse se portera sur les six autres classes ou états de surface.

La qualité des classifications sera évaluée par des matrices de confusion qui déterminent comme indice : la précision globale et l'indice de Kappa.

La précision globale nous renseigne sur la proportion de pixels bien classés au niveau de l'ensemble de l'image et l'indice de Kappa donne une appréciation de la précision de la classification.

7.1 L'analyse pixel à pixel

L'analyse pixel à pixel est construite sur les caractéristiques propres au pixel. L'appartenance d'un pixel à une classe est définie par la méthode de classification choisie lors de la classification.

Les classifications supervisées sont faites sous Erdas Imagine.

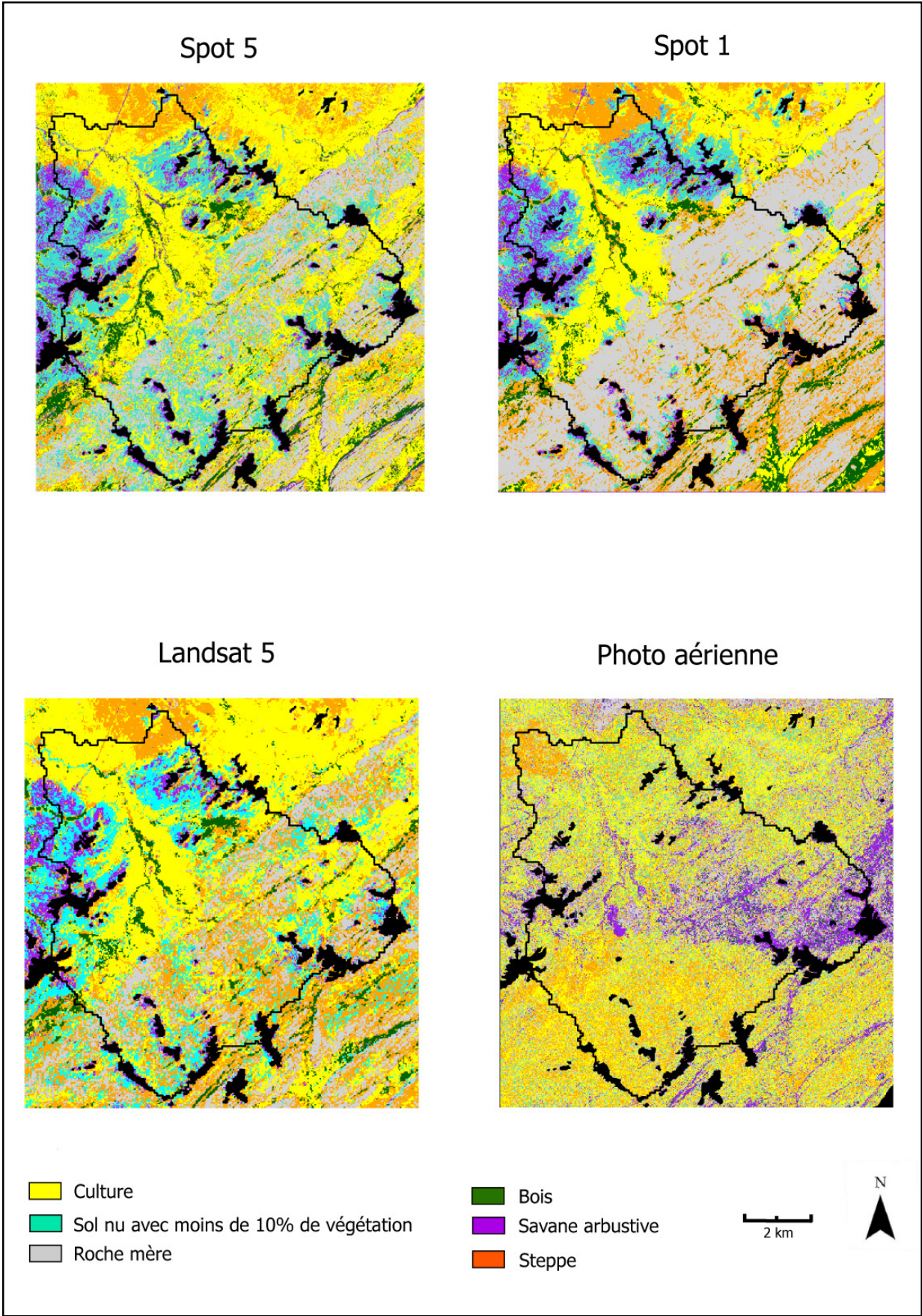
7.1.1 La classification supervisée

Une classification supervisée sera faite pour chaque image de travail. Cette technique est construite à partir d'informations connues sur la zone d'étude pour définir les thématiques à extraire.

La méthode utilisée mise en œuvre pour réaliser ces classification est :

- Création d'une nouvelle image à partir de la combinaison de canaux de travail établie auparavant.
- Classification supervisée à partir des échantillons de travail par minimum distance de telle sorte que chaque pixel soit affecté à l'échantillon le plus proche radiométriquement.
- Validation et estimation de la qualité de la classification par matrice de confusion à partir des échantillons de validation.

Carte 2.3 : Classification supervisée



Le tableau suivant montre les valeurs des indices des matrices de confusion. La totalité des résultats est en annexe (Annexe 5).

Tableau 2.3 : Indices de qualité pour les classifications pixel à pixel

	Précision globale	Indice de Kappa
Spot 5	88,2	88,1
Spot 1	96,8	96,8
Landsat 5	94,0	94,0
Photo aérienne	32,8	24,2

On remarque que la classification de l'image spot 1 est celle qui donne les meilleurs résultats, suivi de près par celle de l'image landsat 5.

Les résultats pour la photo aérienne ne sont pas du tout exploitables et concluants. Cela est dû à la qualité de la photo, l'algorithme de la classification a été perturbé.

Les commentaires qui suivent excluent la classification faite à partir de la photo aérienne.

Malgré des différences dans le détail, les grands ensembles qui partagent le bassin versant sont représentés par toutes les classifications des images satellitaires. Il n'y a pas d'incohérence. En analysant les matrices de confusion dans leur détail on peut remarquer que les classes « roche mère » et « bois » sont dans les trois cas bien représentées. La culture est classée à plus de 95% pour les images spot 1 et landsat 5 alors qu'elle est classée à 80% pour l'image spot5. La classe « steppe » obtient un meilleur résultat de classification pour l'image spot1. Quelque soit l'image satellitaire, elle se confond toujours avec les classes « roche mère » et « culture ». Cependant il y a une distinction entre les résultats de l'image spot 1 et ceux des deux autres images spot 5 et landsat 5. L'image spot1 a été prise en pleine saison humide alors que les deux autres images spot 5 et landsat 5 ont été prises durant la saison sèche et intermédiaire. La steppe étant un sol nu recouvert d'une couverture herbacée on comprend alors que lorsque les pluies arrosent le bassin versant, l'herbe explose à la surface. Une steppe en pleine végétation est plus distincte d'une culture sur pieds qu'une steppe sèche comparée à un sol nu de culture jonché de résidus. De même une steppe durant la saison des pluies se distingue mieux d'un grès que cette dernière durant la saison sèche.

On peut utiliser le même argument pour la classe « savane arbustive » mais dans le sens contraire. Etant claire, la savane doit être mieux différenciable en saison sèche qu'en saison humide.

En ce qui concerne la classe « sol nu avec moins de 10% de végétation », les confusions observables d'une image à l'autre sont plus complexes à argumenter. En saison humide elle se confond de façon importante avec la savane arbustive, beaucoup moins en saison sèche. Les plaques herbeuses existantes sur ces sols doivent apporter des confusions. En effet, la « savane arbustive » et les « sol nu avec moins de 10% de végétation », font partis du même espace géographique, la différence végétative se fait entre ces deux classes.

Un facteur important qui peut expliquer la différence des résultats, soit le pouvoir discriminatoire des trois images, est la saison. Dans le milieu sahélien, la différence entre la végétation en saison sèche et en saison humide est très distincte in situ. Elle l'est tout autant sur image satellitaire.

Le faible résultat pour l'image spot 5, nous amène à faire une critique sur l'échantillonnage. Le même échantillonnage pour les trois échelles est peut être à l'origine de ce résultat. Malgré tout le soin apporté à un échantillonnage homogène thématiquement pour toutes les images, la qualité de la classification pour l'image spot 5 n'est pas au même niveau que celles des autres images.

On peut ajouter que les résultats obtenus, sont issus d'une méthode et qu'ils sont représentatifs de cette dernière. Les échantillons de travail et de validation sont cohérents les uns avec les autres. Il devient alors intéressant et pertinent de confronter ces classifications à la cartographie de référence, afin de déterminer si il y a des différences remarquables entre chacun des formats.

7.1.2 Analyse des résultats par comparaison

Dans cette partie, l'objectif est de mettre en évidence la pertinence des résultats des classifications pixel à pixel par rapport à la cartographie de référence faite par photo interprétation.

La qualité des classifications est ici exprimée par des matrices de confusion (Annexe 6), où les classes de la cartographie de référence sont prises comme éléments de validation.

Tableau 2.3 : Indice de qualité pour les classifications pixel à pixel en fonction de la cartographie de référence

	Précision globale	Indice de Kappa
Spot 5	50,5	48
Spot 1	58,1	56,1
Landsat 5	43,2	39,3

La cartographie de référence a été réalisée, pour mettre les grands ensembles qui constituent le bassin versant de Koumbaka en évidence et observer la limite entre la zone de culture et la zone de nature. Par construction, la photo interprétation distingue moins de détails que l'analyse pixel à pixel. Même après agrégation d'éléments de même signification thématique, la classification pixel à pixel garde un détail d'extraction de l'information que l'on ne retrouve pas dans la photo interprétation. Cette remarque joue pour beaucoup dans les confusions marquées par la comparaison de ces images. En effet, les classes « sol nu avec moins de 10% de végétation », « savane arbustive », « steppe » et « bois » présentent de grandes confusions.

Outre des résultats moins bons que les précédents, puisque la validation a été faite à partir de la cartographie et non des échantillons de validation, on constate que l'ordre de qualité est la même : l'image spot 1 est celle qui obtient le meilleur classement. Cela semble confirmer que la saison humide permet de faire une meilleure discrimination des états de surface.

En ce qui concerne la classe « culture », celle qui intéresse principalement notre étude, on peut souligner une assez bonne concordance entre l'image spot 1 et la cartographie de référence. 72,7% des pixels classés par la classification pixel à pixel correspondent à l'unité cartographique correspondante de la cartographie de référence. Ici aussi on peut dire que la saison à laquelle est prise l'image satellitaire détermine la qualité de la discrimination des états de surface.

Si l'on compare les résultats par classe entre l'image spot 5 et landsat 5, on constate que les pourcentages de pixels bien classés (précision utilisateur) sont de même ordre. Ces deux images sont prises toutes deux en saison sèche. On peut alors constater que pour un même pouvoir discriminatoire au regard de la saison, il n'y a pas une différence significative du pouvoir discriminatoire des différents formats abordés.

A partir de classifications pixel à pixel et selon une même méthode d'extraction de l'information, la végétation active en saison humide apporte aux images satellitaires un meilleur pouvoir de discrimination pour les différents états de surface.

Par contre, il n'est pas possible d'affirmer qu'un format est plus discriminatoire qu'un autre puisque deux images prises à la même saison ne présentent pas de différences notables dans la caractérisation des différents états de surface.

7.2 L'analyse orientée objet

L'analyse orientée objet est une méthode d'analyse d'image utilisée via le logiciel eCognition. Contrairement à l'analyse pixel à pixel ce logiciel extrait l'information sous forme d'objet et non sous forme de pixel.

Pour effectuer une classification on doit avant tout procéder à une segmentation de l'image, les objets résultants sont les unités « homogène » à classer.

eCognition segmente l'image d'étude en fonction de deux principaux paramètres :

- Le paramètre d'échelle : il détermine l'hétérogénéité maximale des objets résultants de la segmentation. Par cela, il joue sur la taille des objets de la segmentation. C'est le paramètre le plus influant sur la segmentation.
- Les critères d'homogénéité : on a ici le critère de couleur et le critère de forme. Ces deux critères sont liés, c'est à dire que la somme de l'importance de ces deux critères est égale à 1. Si l'on diminue le poids de l'un pour une segmentation, le poids du second augmente proportionnellement pour que la somme des deux poids reste constante à une valeur de 1. Le critère de couleur se réfère aux valeurs spectrales des

canaux. Le critère de forme, qui est défini par un équilibre entre le lissé et le compact, permet de déterminer une forme d'objet souhaitée.

Cette segmentation a comme particularité d'être applicable à différentes échelles selon une organisation hiérarchisée. Cela permet de créer différents niveaux d'objets ou d'ajuster par plusieurs itérations la segmentation de travail. Elle est appelée segmentation multi-résolution.

Les classifications réalisables par la suite sont soit construites sur une analyse « plus proche voisin » soit construite à partir de fonctions d'appartenance.

Dans cette partie, l'objectif est d'appliquer une autre méthode d'analyse et de classification aux images pour répondre à notre besoin de discrimination de l'information. Pour garder la même approche méthodologique que la classification pixel à pixel, la classification appliqué à partir de ce logiciel sera la classification « plus proche voisin ». Cette technique est construite à partir d'échantillons de travail qui sont définis par une sélection d'objets représentatifs des diverses unités cartographiques à partir de la segmentation.

7.2.1 La classification

Pour pouvoir faire une classification sous eCognitin, on doit tout d'abord effectuer une segmentation de l'image de travail. Après plusieurs tests de segmentation, en jouant sur les paramètres définis dans la présentation du logiciel, une segmentation commune sera appliquée aux quatre images de travail.

Tableau 2.4 : Paramètres appliqués pour la segmentation

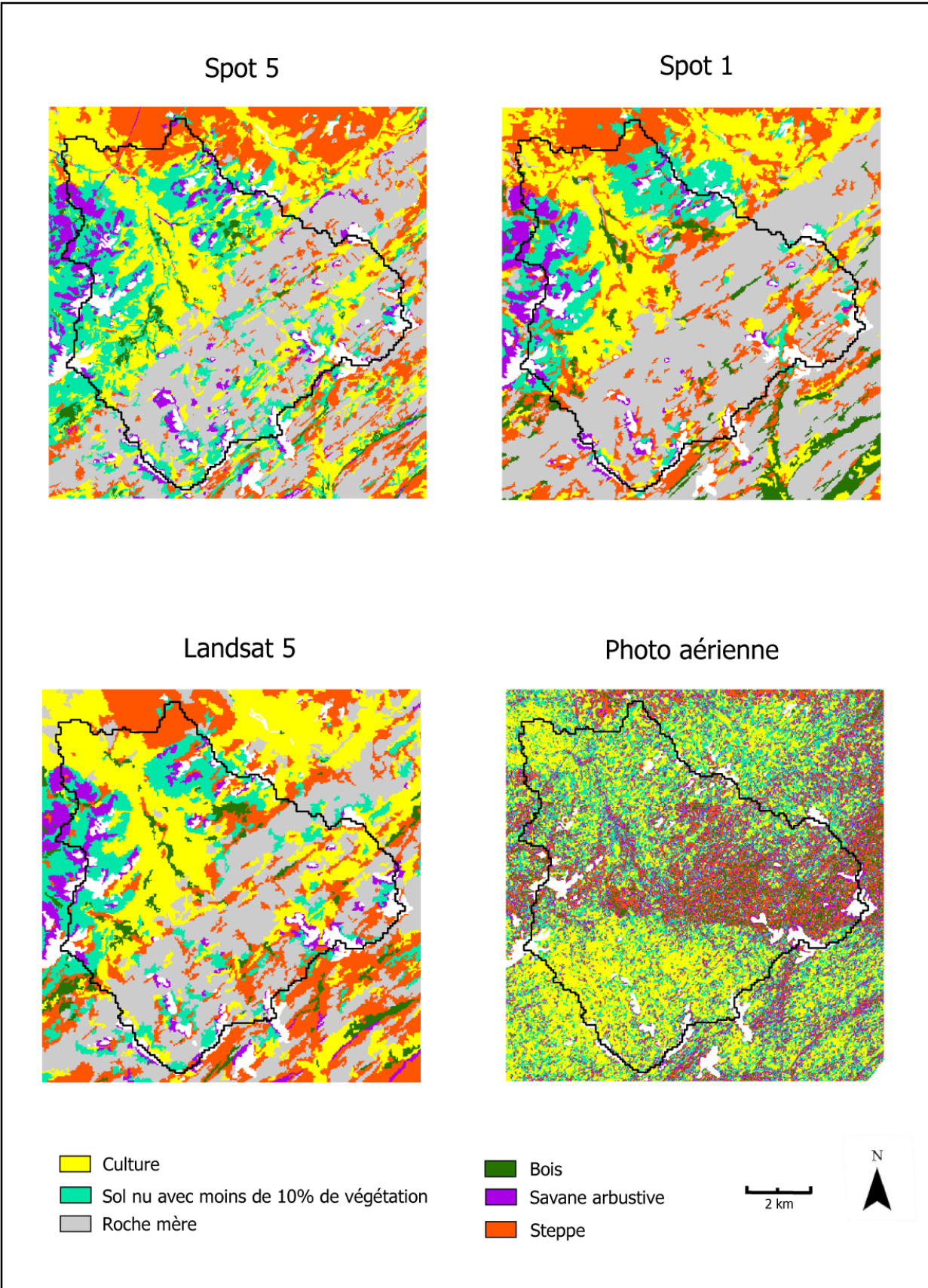
Scale parameter	Weight (poids pour chaque canal)	Homogeneity criterion		
		shape factor	compactness	smoothness
15	1	0,1	0,3	0,7

Par le choix des paramètres, la segmentation est influencée par la valeur spectrale des canaux (shape factor) et s'adapte à la forme des objets présents sur les images (smoothness).

La méthodologie suivie pour effectuer ces classifications est :

- Segmentation de l'image selon les mêmes paramètres.
- Sélection des objets issus de la segmentation comme échantillons de travail, au regard des échantillons de travail issu des relevés de terrain, puis classification.
- Validation par matrices de confusions à partir des échantillons de validation.

Carte 2.4 : Classification orientée objet



Le tableau suivant montre les valeurs des indices des matrices de confusion. La totalité des résultats est en annexe (Annexe 7).

Tableau 2.5 : Indice de qualité pour les classifications orientée objet

	Précision globale	Indice de Kappa
Spot 5	94,1	94,1
Spot 1	98,0	98,0
Landsat 5	93,7	93,7

Ici aussi la classification de la photo aérienne n'est pas exploitable. Elle ne sera pas prise en compte pour les commentaires à suivre.

Globalement ces classifications donnent des résultats meilleurs que la classification pixel à pixel selon les indices de qualité de la validation. L'image spot 1 donne le résultat le plus fort.

Cela confirme l'importance de la saison à laquelle est prise l'image pour obtenir un pouvoir discriminatoire maximal entre les états de surface.

Cependant, il ne faut pas prendre ces résultats numériques de validation comme une référence absolue. En effet, en comparant visuellement les classifications issues des deux méthodes on peut se rendre compte que la spatialisation des classes et des confusions se localisent au même endroit. Les chiffres donnés par les matrices de confusion (précision utilisateur) rendent compte des mêmes cohérences ou incohérences que celles présentées pour les classifications pixel à pixel. A savoir des confusions entre « culture » et « steppe », « roche mère » et « steppe », « savane arbustive » et « sol nu avec moins de 10% de végétation ».

On peut faire une remarque en ce qui concerne l'image landsat 5. L'analyse pixel à pixel montre des confusions entre « culture » et « roche mère » et entre « roche mère » et « steppe ». On retrouve ces mêmes confusions par l'analyse objet et de façon très accentuée. C'est à dire que l'espace de confusion est plus important. On peut émettre l'hypothèse qu'une segmentation sur une résolution de 30 m est trop grossière pour limiter la spatialisation des

confusions en fonction de la précision requise pour répondre à notre sujet. Cette remarque s'applique qu'à ces deux couples de confusion.

De plus, il est important de garder à l'esprit que les classifications faites par cette méthode sont construites sur un échantillonnage de la segmentation. Ces échantillons ont été choisis là où les échantillons de travail issus des relevés de terrain ont été créés. Cependant, il suffit que la segmentation du logiciel donne des objets de taille plus importante que les échantillons de validation et les résultats de la matrice de confusion peut être sur évaluée.

En tenant compte de toutes les remarques faites, on peut dire que globalement et d'un point de vue géographique, l'analyse orientée objet ne donne pas de meilleurs résultats pour la caractérisation des états de surface comme peuvent l'indiquer les indices, par rapport à l'analyse pixel à pixel.

7.2.2 Analyse des résultats par comparaison

D'une façon analogue à celle exposée pour l'analyse pixel à pixel les classifications issues de l'analyse objet sont comparées à la cartographie de référence.

La qualité des résultats par matrice de confusion sont données dans le tableau suivant (Annexe 8).

Tableau 2.6 : Indice de qualité pour les classifications orientées objet en fonction de la cartographie de référence

	Précision globale	Indice de Kappa
Spot 5	66,7	66,7
Spot 1	62,6	61,3
Landsat 5	55,1	52,8

Globalement les concordances sont meilleures et les écarts entre les différentes classifications sont moindres. Cela peut s'expliquer par la similarité entre l'analyse orientée objet et l'analyse par photo-interprétation. En effet ces deux techniques sont construites sur

une analyse d'ensemble et d'homogénéité de pixels. Le découpage des unités est construit sur un regroupement homogène d'entités élémentaire (ici, les pixels).

Les classes géographiquement éparées sur le territoire d'étude sont moins bien représentées que celles se concentrant sur une même zone, c'est le cas pour la « savane arbustive », la « steppe » et le « bois ». Cela est dû à la cartographie de référence qui est orientée sur la mise en évidence des grands ensembles. Les classes « culture », « sol nu avec moins de 10% de végétation » et « roche mère » sont les plus concordants, elles sont sectorisées dans l'espace.

Si les classifications de l'image spot 1 ont toujours donnés de meilleurs résultats que les deux autres, pour cette comparaison elle se trouve en deuxième position derrière l'image spot 5. Il semblerait que la résolution spectrale de l'image ait une importance plus importante dans le pouvoir discriminatoire des images que le pouvoir discriminatoire apporté par la saison humide. L'image spot 5 a la plus petite résolution spatiale, 10 m. La segmentation s'opère alors sur des objets de taille moindre que pour les autres images et l'agrégation de ces objets donne une classification plus précise.

Cette remarque ne permet pas de remettre en cause la saison à laquelle sont prises les images. La différence entre une végétation sèche et une végétation vigoureuse dans le milieu sahélien est réel, elle est très visible sur des images brutes. On peut penser que la méthode d'analyse orientée objet diminue l'effet de discrimination que peut apporter une image prise en saison humide.

Ce que l'on peut retenir pour cette méthode, c'est que le pouvoir discriminatoire des images est influencé par la résolution des formats utilisés.

L'image landsat 5 est la moins concordante avec l'image de référence. Pour une analyse orientée objet, une résolution spatiale de 30 m n'est pas adaptée à la précision de découpage de l'espace qu'exige notre étude.

7.3 A propos de la limite nature-culture

Pour pouvoir discuter de la caractérisation de la limite culture-nature à partir des classifications, et toujours par comparaison avec la cartographie de référence, il a paru plus simple de se focaliser sur la zone d'incertitude (cf. 2.1.3).

Pour pouvoir donner un appréciation qualitative, la comparaison est faite ici à partir des éléments « culture » et des éléments n'appartenant pas à la classe « culture ». Pour chaque classification, l'espace correspondant à la zone d'incertitude délimitée par la photo interprétation a été extrait, puis selon l'appartenance de chaque pixel deux catégories ont été définis : les pixels « culture » et les pixels « non culture ».

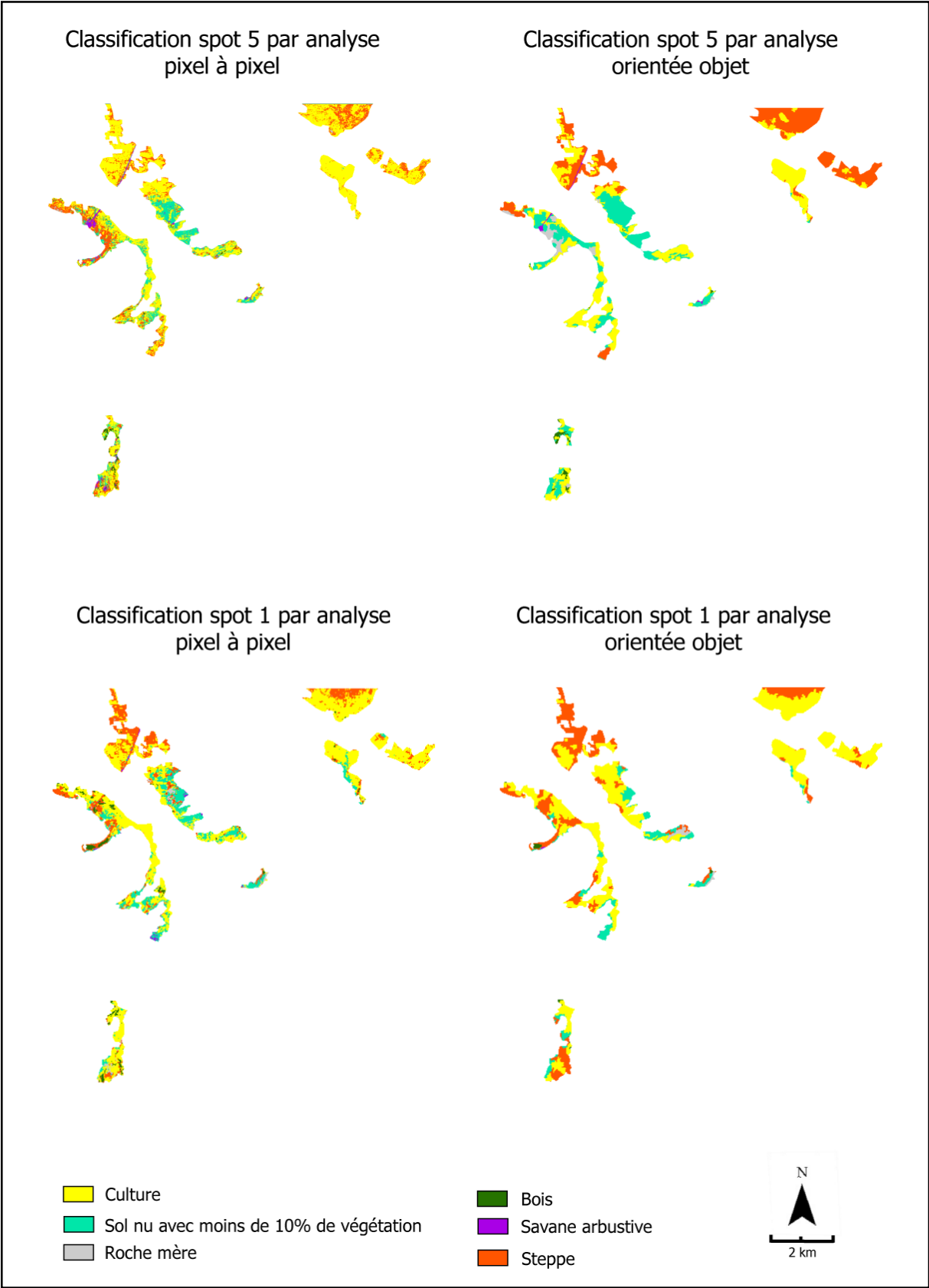
Le tableau suivant exprime le pourcentage des deux classes déterminées dans les limites de la zone d'incertitude. Les pourcentages sont obtenus sur un calcul fait à partir du nombre de pixels observés.

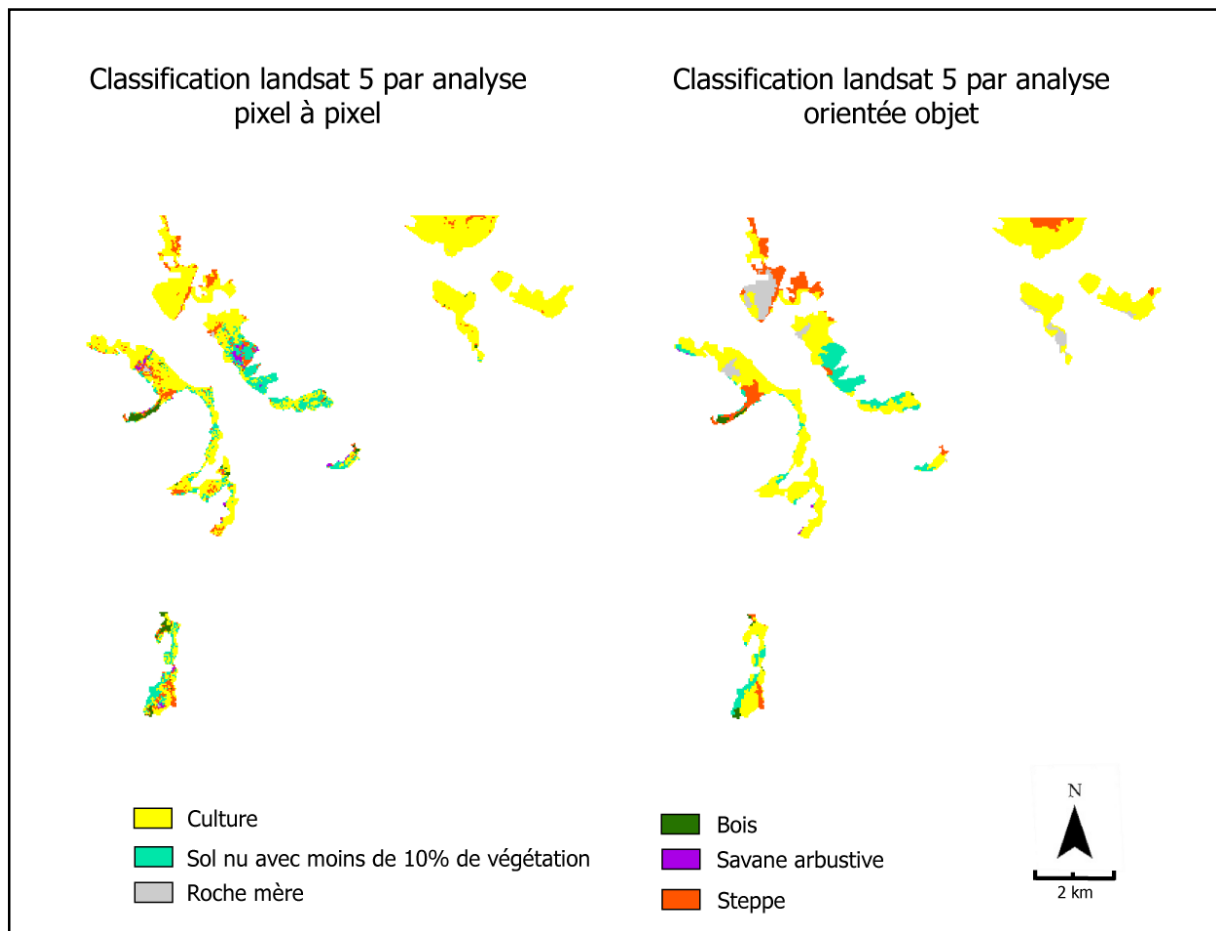
Ces chiffres sont à considérer comme une information qualitative.

Tableau 2.7 : Représentation des classes « culture » et « non culture » dans la limite de la zone d'incertitude pour chaque classification

		Représentation en pourcentage	
		Culture	Non culture
Pixel à pixel	Spot 5	62,63	37,37
	Spot 1	59,5	40,5
	Landsat 5	72,47	27,53
Orienté objet	Spot 5	41,25	58,75
	Spot 1	58,98	41,02
	Landsat 5	67,12	32,88

Carte 2.5 : Classifications des images satellitaires dans la limite de la zone d'incertitude





Il est difficile de définir une classification comme étant la meilleure pour caractériser la limite culture-nature. Les remarques faites dans les parties précédentes peuvent nous éclairer. En effet, on peut seulement affirmer qu'en utilisant des images en saison humide la discrimination des états de surface sera meilleure notamment pour une analyse pixel à pixel. Les confusions sont alors moindres entre l'espace de culture et les autres espaces naturels adjacent (notamment avec la steppe).

En ce qui concerne l'analyse orientée objet, la résolution spatiale semble être une limite, en ce qui concerne la finesse de la segmentation de l'image. L'agrégation des objets de l'image Landsat 5 donne une classification plus grossière. La limite est alors moins précise et ne permet pas de rendre compte de l'extension spatiale de l'espace agricole. Les parcelles de culture disjointes qui morcellent l'espace de steppe, ne sont pas visibles. L'amalgame opéré par la classification « lisse » la frontière entre ces deux classes. L'extension spatiale de la

culture sur les sols nus, qui se fait de façon plus diffuse, n'est pas aussi bien exprimée ou du moins de façon grossière par la classification à cette résolution spatiale.

Les résultats du tableau 5 laissent penser que quelque soit la méthode utilisée pour caractériser les états de surface, la limite nature-culture reste identique. Les proportions entre « culture » et « non culture » pour les images spot 1 et landsat 5 selon les deux méthodes de classification sont sensiblement du même ordre. Cela voudrait dire qu'une méthode n'est pas plus précise qu'une autre. Les chiffres du tableau 5 pour l'image spot 5 n'étaient près cette remarque. Cependant par analyse visuelle, les deux classifications spot 5 vont dans le sens de cette remarque.

Il semble alors, utile de faire un compromis dans le choix de la méthode en fonction des remarques faites précédemment et du format image disponible. D'un point de vue visuelle, l'analyse orientée objet répond mieux à la caractérisation d'une limite. L'effet « moucheté » de la classification pixel à pixel, ne donne pas plus de précision, elle rend même l'image plus difficile à exploiter pour définir une limite. L'analyse orientée objet donne des limites propres et tracées, sans pour autant perdre en précision.

Chapitre 2 : Caractérisation de la zone de transition entre espace cultivé et espace naturel

La caractérisation des états de surface par classification est limitée par le pouvoir discriminatoire des images. Les confusions existantes à l'échelle de l'image entière limitent une discrimination fine entre l'espace de culture et les espaces naturels.

L'objectif dans cette partie est de définir une technique pour réduire l'espace de travail qui serait représentatif de la zone où se situe la transition entre l'espace de culture et les autres espaces naturels. Pour cela on va s'appuyer sur l'organisation spatiale naturelle et anthropique du territoire. Dans le milieu sahélien, les bassins versant peuvent être décomposés en trois parties : les fonds de vallée, plats et marqués par la présence d'un cours d'eau ; les versants, caractérisés par des sols nus peu végétalisés ; et les plateaux ou bowé. Les espaces de culture naissent de part et d'autre des cours d'eau et occupent les fonds de vallée. L'impact du changement climatique depuis quelques dizaines d'années a induit un besoin d'extension des espaces agricoles pour répondre aux besoins des populations. Cette extension se fait alors vers l'extérieur des fonds de vallée pour coloniser les bas de versant.

L'espace de transition entre l'espace agricole et le milieu naturel peut alors être caractérisé par la toposéquence du milieu. L'idée est de modéliser l'organisation spatiale du territoire pour réduire l'espace de travail à la zone spécifique de transition culture-nature.

Pour caractériser la toposéquence du bassin versant on utilisera un Modèle Numérique de Terrain à partir duquel sera extrait un fichier de pente. Les pentes rendent compte des fonds de vallée, des versants et des plateaux.

Pour caractériser l'espace agricole on utilisera la distance au réseau hydrographique. En effet, de part et d'autre des cours d'eau se situent les terres agricoles. Leur extension se fait par éloignement au cours d'eau vers les bas de versants.

A partir de ces deux caractéristiques le critère utilisé pour une caractérisation spatiale du territoire est une combinaison entre la distance au réseau et la pente.

A partir de ce critère de discrimination spatiale un nouvel espace de travail restreint va être créé par seuillage. L'espace d'incertitude de la limite culture-nature déterminé par la photo interprétation est pris comme référence pour calibrer le seuillage.

La méthodologie globale utilisée pour déterminer un nouvel espace de travail est construite sur quatre phases :

- Création d'une couche raster pente à partir du MNT
- Extraction automatique du réseau hydrographique à partir du MNT
- Création de la nouvelle couche « critère ». Elle porte les informations pente et distance combinées
- Détermination d'un seuillage en se référant à la zone d'incertitude et création d'un nouvel espace de travail.

8 Définition des deux approches de discrimination spatiale

Ce travail va être réalisé sous le logiciel ArcGis 9.1. Deux méthodes d'approches vont être testées.

La première approche s'est basée sur une définition simple du calcul de distance d'un point à un autre combiné par une relation mathématique à la pente. Dans ce cas, le fichier à partir duquel est fait le seuillage est construit sur la combinaison de deux fichiers pente et distance au réseau hydrographique.

Le logiciel Arcgis permet différents calculs de distance dont un calcul de distance pondéré par une contrainte définie par l'utilisateur. Dans ce cas, le logiciel calcule un fichier de distance au réseau hydrographique en intégrant le fichier pente comme élément de contrainte. C'est sur le fichier obtenu que s'applique le seuillage.

La démarche méthodologique est identique pour les deux approches, seule la création de la couche de seuillage diffère.

8.1 Détail de la méthodologie générale

Dans cette partie, les étapes méthodologiques communes aux deux approches sont décrites :

- Création d'une couche raster pente à partir du MNT

Le fichier pente est créé avec le logiciel ArcGis à partir du MNT. Le MNT est propre à l'utilisation. C'est de façon automatique que le logiciel crée ce fichier de pentes, les valeurs de sorties sont gardées en degré.

- Création du réseau hydrographique à partir du MNT

Le réseau hydrographique est considéré ici comme l'élément source à partir duquel vont être calculées les distances. Pour cela on va créer un fichier raster après extraction du réseau hydrographique à partir du MNT. Ce sera fait de façon automatique sous le logiciel Arcgis à partir d'une extension « hydrologie » qu'il a fallu télécharger⁴.

Pour générer un réseau hydrographique il faut choisir un nombre minimum de pixel qui constitue le tronçon hydrologique. Le résultat recherché est la création des drains principaux, notamment celui du fond de vallée. Après plusieurs tests, un nombre de pixel minimum estimé à 350 a paru correct.

- Détermination d'un seuillage en se référant à la zone d'incertitude et création d'un nouvel espace de travail.

A ce niveau d'application, on est en possession des couches issues des deux approches qui constituent notre critère de discrimination spatiale, prêtes au seuillage. Comme il l'a été énoncé plus haut, le seuillage est réalisé en se référant à la zone d'incertitude issue de la photo interprétation. C'est à dire que l'on veut obtenir par seuillage une zone qui corresponde au plus proche à l'espace délimité par la zone d'incertitude.

La validation du seuillage va se faire par comparaison entre le nombre de pixel sélectionné par le seuillage inclus ou pas dans la zone d'incertitude. Le problème qui se pose est de trouver un équilibre entre un seuillage qui ne soit pas trop excédentaire ou trop déficitaire par rapport à l'espace délimité par la zone d'incertitude.

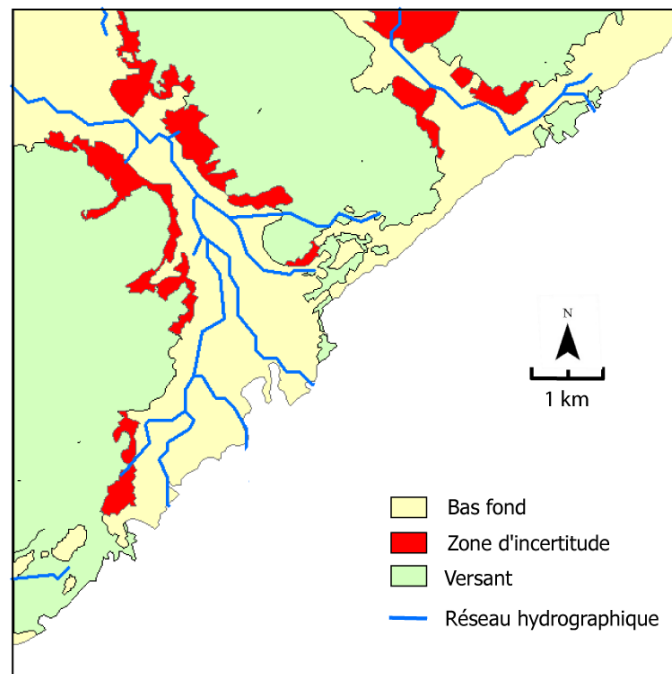
⁴ http://support.esrifrance.fr/index.asp?page=/outilsscripts/arcgis/spatial_analyst/calculshydro/calculshydro.html

Pour effectuer la comparaison, Les couches « critère » et la couche de référence photo-interprété ont été redéfinies tel que :

Pour la photo interprétation le territoire a été découpé en trois secteurs :

- Le bas fond de vallée
- La zone d'incertitude
- Le versant

Carte 3.1 : Zone de références établies par photo-interprétation



La zone de bas fond de vallée délimite l'espace qui s'étend du réseau hydrographique à la limite inférieure de la zone d'incertitude.

La zone versant délimite l'espace qui s'étend à partir de la limite supérieure de la zone d'incertitude vers l'extérieur.

La couche issue du seuillage découpe le territoire en deux secteurs. La zone seuillée et le reste de l'espace qui ne nous intéresse pas dans ce travail.

En superposant les deux couches de seuillage et de référence, on extrait les pixels de la zone seuillée en fonction des trois secteurs définis par la photo interprétation. Ce que l'on cherche c'est un seuillage qui se superposerait au mieux avec la zone d'incertitude. Pour cela deux conditions doivent être remplies :

- le nombre de pixels englobé par le seuillage et qui correspond aux zones « bas fond » et « versant », doit être minimum.
- le nombre de pixels correspondant à la zone d'incertitude non pris en compte par le seuillage doit être minimum.

Comme le seuillage ne permet pas d'obtenir une concordance exacte c'est alors un équilibre entre les deux conditions précédemment exposées que l'on va rechercher à atteindre. Cet équilibre est traduit par le critère de qualité suivante :

$$\left[\left[\frac{S_s \cap S_o}{S_o} \right]^2 \times \left[\frac{1 - (S_s \cap S_v)}{S_v} \right] \times \left[\frac{1 - (S_s \cap S_p)}{S_p} \right] \right]^{(1/4)}$$

Avec S_s : surface seuillée (issue de l'analyse morphologique)

S_o : surface de la zone d'incertitude

S_v : surface de la zone versant

S_p : surface de la zone bas fond

} (issues de la photo interprétation)

Ce critère de qualité sera calculé pour tous les seuillages testés. La valeur la plus importante calculée correspondra au seuil qui englobera au mieux la zone d'incertitude sans s'étendre de façon trop excessive sur les espaces extérieurs.

8.2 Par distance euclidienne au réseau hydrographique

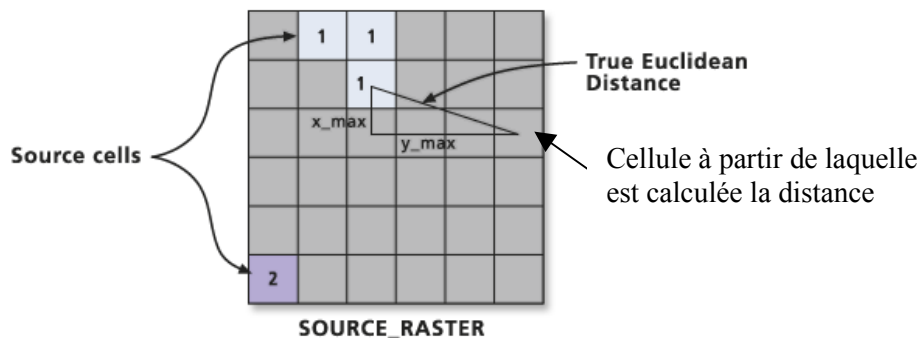
Pour générer une couche de seuillage qui prenne en compte la distance euclidienne au réseau hydrographique il faut être en possession de deux couches :

- La couche pente
- La couche distance au réseau hydrographique

Grâce à la calculatrice raster du logiciel Arcgis, on multiplie les valeurs de chacune des couches pour créer la couche critère « pente \times distance euclidienne au réseau hydrographique », sur laquelle sera effectué le seuillage. Cette nouvelle couche porte une combinaison des deux informations pente et distance.

La couche distance au réseau hydrographique est générée de façon automatique sous le logiciel à partir du réseau hydrographique généré auparavant (issu du MNT). Le calcul opéré affecte à chaque pixel la distance qui le sépare de la source la plus proche. Dans le cas présent la source est le réseau hydrographique.

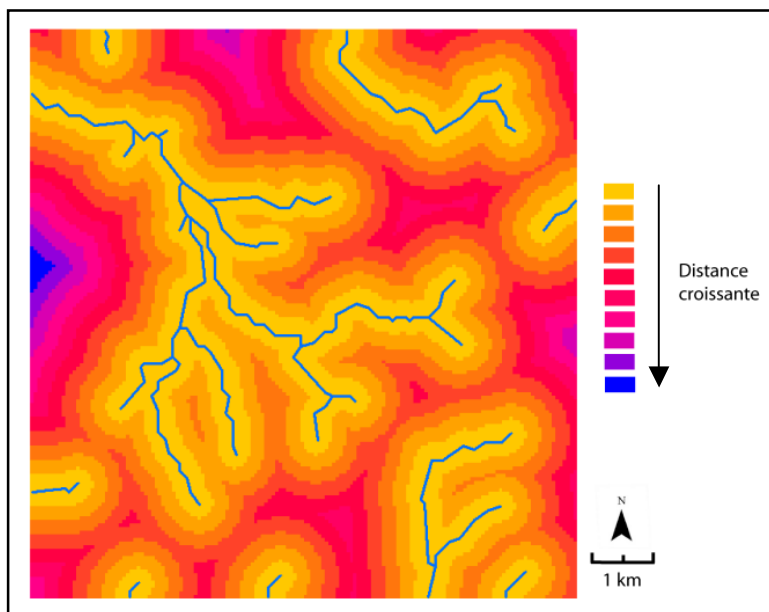
Figure 3.1 : Algorithme de calcul du logiciel



Source : Logiciel Arcgis

La distance euclidienne correspond au calcul de la distance entre deux centres de cellule en « ligne droite ».

Carte 3.2 : Couche issue du calcul de la distance euclidienne au réseau hydrographique



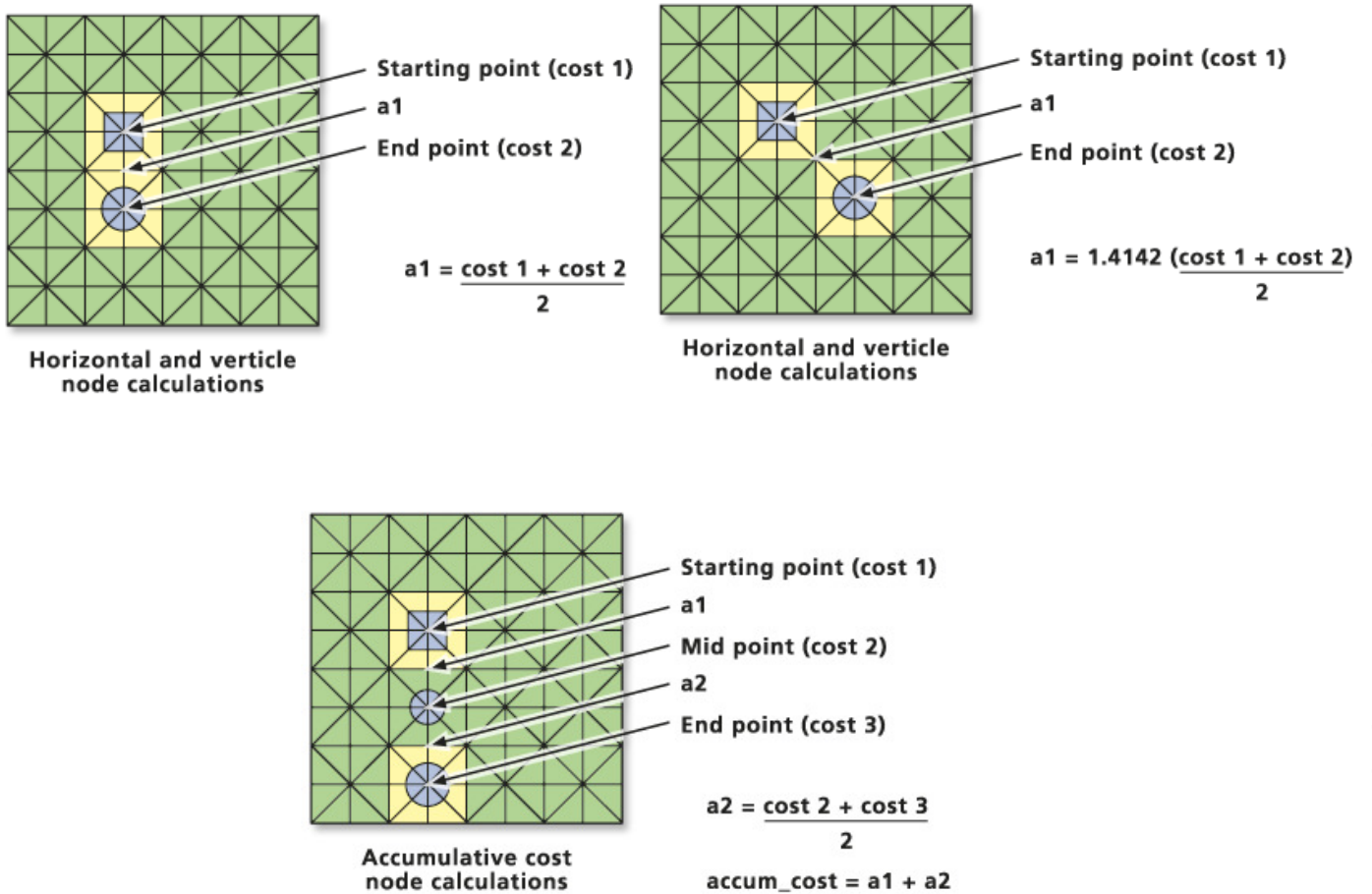
La combinaison des deux couches distance et pente par une simple multiplication, nous amène à créer une couche de distance au réseau hydrographique pondéré par la pente. Cette pondération s'effectue au niveau de chaque pixel sans lien avec les pixels voisins. La logique de l'organisation spatiale selon la topographie reste conservée. Les faibles valeurs correspondent aux espaces proches du réseau hydrographique en zone plane, les fortes valeurs regroupent les espace éloignés avec des pentes plus ou moins fortes ou des zones proches à fortes pentes, les valeurs moyennes, celles qui nous intéressent définissent les zones se rapprochant des versants avec des pentes assez douces pour pouvoir y pratiquer une agriculture.

8.3 Par distance au réseau hydrographique pondérée par un coût

La couche de seuillage créé à partir des deux facteurs pente et distance au réseau hydrographique se fait dans ce cas de façon automatique par la fonction calcul de distance par « coût pondéré » (Spatial Analyst). La distance d'un point à la source la plus proche est

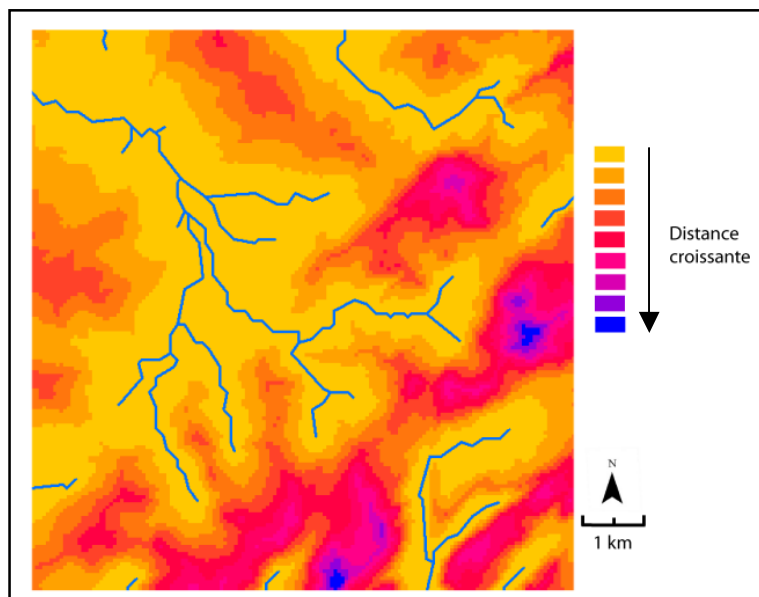
calculée en choisissant le moindre effort pour y parvenir, au regard d'une couche de coût. Cette couche de coût pondère les différents chemins entre un point et les diverses sources.

Figure 3.2 : Algorithme de calcul du logiciel



Source : logiciel Arcgis

Carte 3.3 : Couche issue du calcul de la distance au réseau hydrographique avec coût pondéré



Cette méthode met donc l'accent sur l'accumulation des efforts pour relier deux points. Ce mode de pondération de la distance nous a semblé très cohérent avec notre démarche. En effet, nous voulions simuler l'occupation et l'extension spatiale des terres agricoles selon la topographie du territoire. La population locale a tendance à coloniser les versants de faible pente et les espaces les plus plats. Cette technique qui prend en compte la somme des efforts ou contraintes qui sont ici celle de la pente retranscrit bien le comportement réel des populations du milieu. La discrimination spatiale se fait ici par propagation et prend d'une façon plus réaliste les contraintes topographiques du milieu.

9 Application au MNT SRTM

Pour une même méthode de discrimination de l'espace deux approches sont envisagées : l'approche par distance euclidienne et l'approche par distance avec coût pondéré. Une fois les couches « critère » réalisées pour les deux approches, différents seuillages ont été effectués. Un indice de qualité pour chaque test a été calculé par application du critère défini précédemment.

Le travail a été effectué à partir du MNT SRTM à 90m. Cependant dans l'éventualité d'obtenir de meilleurs résultats, les tests ont aussi été réalisés sur le même MNT rééchantillonné à 30 m. Comme le rééchantillonnage n'apporte pas un complément d'information et que les résultats obtenus étaient moins bons qu'avec le MNT original, ces essais ne seront pas exposés. Tous les commentaires à venir sont faits pour un travail effectué sur le MNT à 90m.

Toujours dans l'objectif de chercher une meilleure discrimination spatiale, les tests ont été appliqués à partir du critère « pente – distance » et à partir du critère « pente² - distance ». En élevant au carré la pente l'idée est d'augmenter les écarts entre les différentes valeurs de pente pour une meilleure discrimination.

Des problèmes ont été rencontrés lors de la mise en place de la méthodologie. Des étapes intermédiaires ont dû être effectuées.

Pour l'approche par distance euclidienne, il a fallu avoir recours à des techniques de morphologie mathématique pour améliorer la qualité du zonage après seuillage. Une fermeture puis une ouverture ont permis de « nettoyer » l'image obtenue. En effet, le fait de multiplier la pente par la distance au réseau hydrographique augmente les incohérences ou artefacts qu'il peut y avoir dans les modèles numériques de terrain. Les résultats obtenus après seuillage comprenaient toujours des pixels isolés sur l'image et des pixels manquants dans l'espace de seuillage. En appliquant des techniques de morphologie mathématique, les pixels sont éliminés ou englobés dans la zone de seuillage et l'image est plus « propre ». Pour les deux approches testées, on a appliqué un filtre moyenne sur la couche pente² avant de l'utiliser. Elever des valeurs erronées au carré amplifie leur impact quant à la concordance de l'image. Le filtre moyenne, ajuste les valeurs voisines les unes par rapport aux autres et lisse les effets perturbateurs.

9.1 Résultats

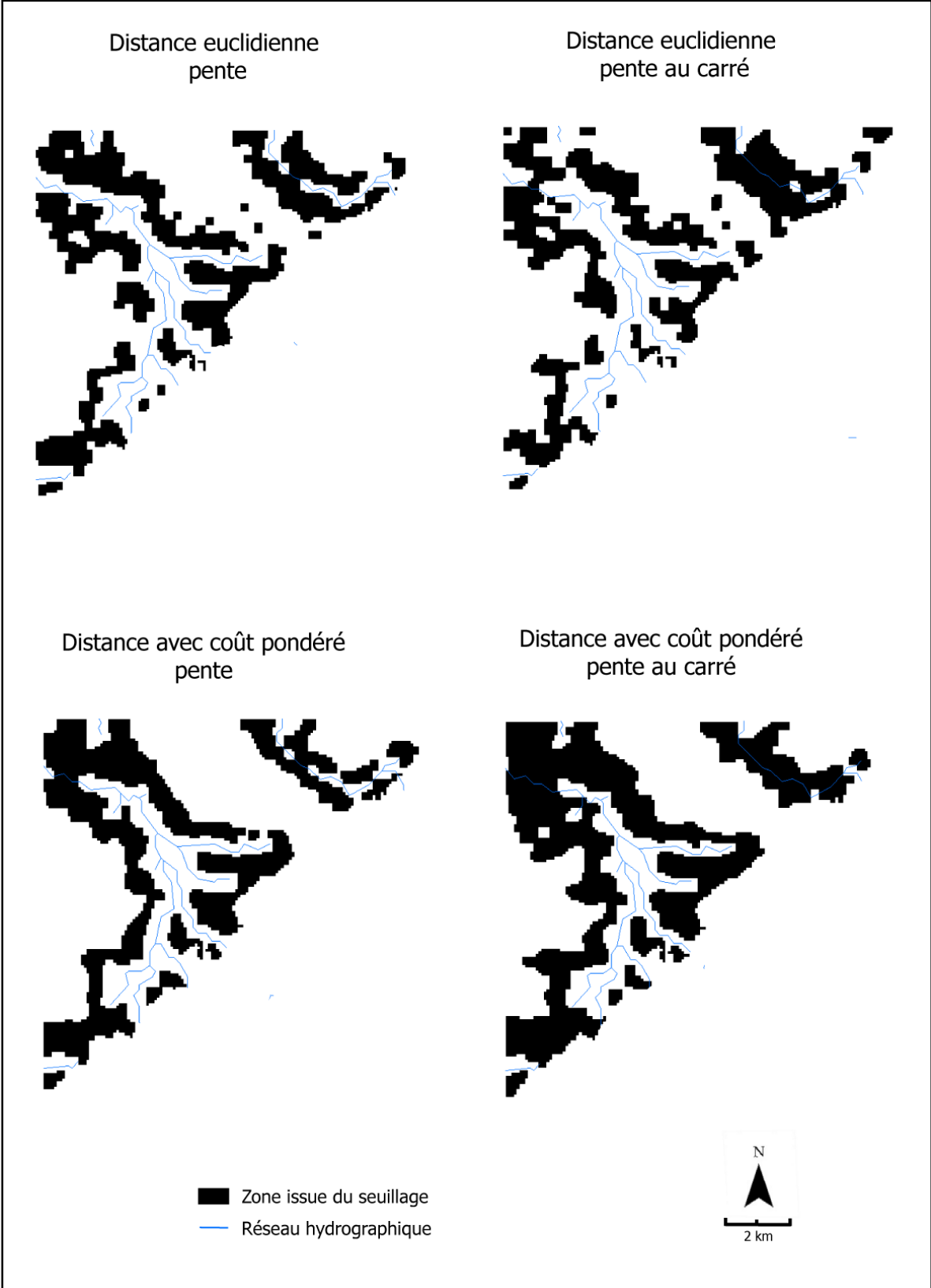
La qualité des résultats est définie par le tableau suivant. Seuls les meilleurs résultats pour chaque approche sont mentionnés.

Tableau 3.1 : indice de qualité pour les seuillages testés

		Seuillage	Surface de référence	Surface versant	Surface plane	$\left[\frac{(S_s \cap S_o)}{S_o} \right]^2 \left[1 - \frac{(S_s \cap S_v)}{S_v} \right] \left[1 - \frac{(S_s \cap S_p)}{S_p} \right]^{1/4}$
			$(S_s \cap S_o) / S_o$	$1 - \frac{(S_s \cap S_v)}{S_v}$	$1 - \frac{(S_s \cap S_p)}{S_p}$	
Distance euclidienne	pente	150_500	0,73	0,75	0,60	0,70
	pente ²	100_600	0,63	0,72	0,61	0,64
Distance avec coût pondéré	pente	100_400	0,70	0,76	0,56	0,67
	pente ²	50_400	0,76	0,65	0,47	0,65

Les résultats numériques montrent que les deux approches testées sont qualitativement identiques. L'utilisation de la pente au carré n'apporte pas une information plus discriminative que l'utilisation de la pente simple.

Carte 3.4 : Résultat des meilleurs seuillages pour chacune des approches



Si les résultats numériques donnés par l'indice de qualité ne rendent pas compte d'une différence de discrimination entre les deux approches utilisées, l'appréciation visuelle du zonage permet de faire un choix.

Par l'approche distance euclidienne on se heurte à des problèmes de pixels isolés et d'interruptions dans le tracé de la zone. Par construction il n'y a pas de cohérence entre les pixels voisins, c'est ce qui perturbe le seuillage. En effet, des espaces éloignés de notre zone d'intérêt avec des pentes faibles peuvent être englobés par le seuillage appliqué et des espaces proches de notre zones d'intérêt avec des pentes fortes peuvent ne pas être pris en compte par le seuillage et induire des interruptions dans la zone obtenue.

Par l'approche distance avec coût pondéré, on obtient des résultats plus « propres ». Une cohérence entre pixels voisins est induite par le calcul de la somme des contraintes pour déterminer la distance au réseau hydrographique. Le seuillage se fait par propagation et le tracé de la zone comporte beaucoup moins d'interruptions voire pas du tout.

Comme l'objectif est de se rapprocher de l'évolution réelle de l'extension de l'espace de culture vers les bas de versant pour déterminer un nouvel espace de travail plus restreint, il est alors préférable d'utiliser l'approche par calcul de distance par coût pondéré.

Une fois cette nouvelle zone de travail déterminée, il avait été envisagé de faire un retour sur les méthodes automatiques de classification appliquées au chapitre 2. L'idée était de combiner une discrimination morphologique et une discrimination radiométrique. C'est à dire faire une nouvelle classification sur cette zone à partir de la nomenclature de travail mais plus restreinte. Les classes « sol gravillonnaire », « sol gravillonnaire-terreux » et « sol terreux » doivent être distinguées ; et les classes « roche mère » et « bowé » ne se trouvent pas dans ce nouvel espace. Ainsi, des confusions obtenues par une analyse globale des images seraient éliminées et l'on pourrait juger de la qualité du pouvoir discriminant des images pour une analyse spécifique à la limite culture-nature. Par manque de temps le travail n'a pas été poussé jusque là.

Discussion et conclusion

La caractérisation des différents états de surface par les méthodes automatiques d'extraction de l'information sont sensibles à la saison à laquelle les images satellitaires ont été prises. La saison humide donne un pouvoir plus discriminatif à l'image que la saison sèche.

On a pu remarquer que le pouvoir de discrimination par l'analyse pixel à pixel et par l'analyse orientée objet ne donnait pas de résultats nettement différents. Cependant, une segmentation sur une image à 30 m de résolution donne une classification trop grossière pour nos besoins. Ces résultats sont bien entendu à prendre avec quelques précautions. En effet, ils sont issus d'un travail de stage et donc d'apprentissage. Des biais dans la méthode de travail et d'approches existent. L'échantillonnage de travail et de validation a été réalisé durant la phase de prise de connaissance avec le milieu d'étude et avec les images satellitaires. Aujourd'hui, alors que le stage se termine, peut être qu'un nouvel échantillonnage s'appuyant sur une meilleure connaissance des outils et des documents disponibles rendrait de meilleurs résultats, comme un échantillonnage spécifique à chacun des différents formats et non pas un échantillonnage unique.

En ce qui concerne la caractérisation de la limite nature-culture, les tests effectués par les méthodes automatiques ne permettent pas de définir un format d'image plus efficace qu'un autre. On a pu seulement constater que l'analyse orientée objet permet un découpage de l'espace plus net et donc plus approprié au besoin de définir une limite.

L'approche utilisée par le travail effectué sur le MNT est intéressante dans sa conception et dans ses résultats. En effet, la discrimination spatiale opérée, et notamment celle faite par le calcul de distance par coût pondéré, permet de retranscrire l'évolution réelle des surfaces agricoles sur le territoire. On obtient alors un zonage restrictif et cohérent de l'espace, focalisé sur l'objet de l'étude, c'est à dire la limite culture-nature. C'est ici que l'on trouve le point fort de ce stage. Si le temps avait pu me permettre de faire un retour sur les classifications automatiques à partir de la nouvelle zone créée, le travail mené serait allé au-delà de l'application des méthodes classiques d'extraction de l'information. La discrimination morphologique testée se veut caractéristique de l'évolution réelle de la pression anthropique

sur le territoire. Une telle approche est empreinte de la vérité terrain. L'idée d'une combinaison entre cette discrimination morphologique et une discrimination spectrale ouvre alors des perspectives quant aux pistes à suivre pour la suite de cette étude.

A la suite de toutes ces remarques, on peut dire qu'il est possible de suivre l'évolution des états de surface à partir des méthodes expérimentées. Il semble que l'analyse pixel à pixel correspondrait mieux pour caractériser l'évolution des états de surface à partir d'images multi format. Il faut à ce moment là s'affranchir des problème d'échelle si l'on veut utiliser la même nomenclature. Cela renvoie à la notion d'échelle optimale. Cette notion aurait mérité d'être approfondie pour cette étude mais par manque de temps cela n'a pas été fait.

Il semblerait que l'analyse orientée objet serait la méthode d'extraction automatique de l'information appropriée pour caractériser la limite culture-nature puisque les résultats donnent des frontières franches entre les différentes unités cartographique.

Au regard des bons résultats que peut offrir une discrimination spatiale, il semblerait judicieux d'utiliser cette méthode couplée aux deux précédentes pour caractériser de façon plus efficace la limite culture-nature.

Pour répondre aux besoins du projet RESSAC une méthode de travail en deux temps peut être envisagée :

- Caractérisation des états de surface par les méthodes automatiques sur image entière. L'analyse de l'évolution se fait alors de façon globale.
- Restriction de l'espace de travail pour se focaliser sur la zone de transition entre la limite culture-nature sur laquelle on applique de nouvelles classifications (de préférence par l'analyse orientée objet) à partir d'une nouvelle typologie plus restreinte. Dans ce cas l'évolution de cette limite est plus finement appréciable. Ici on répond plus spécifiquement à l'évolution de la pression anthropique.

Bibliographie

- Bonn, F. and G. Rochon** (1993). Précis de télédétection : vol.1 : principes et méthodes. Sainte-Foy, CAN, Presses de l'Université du Québec.
- Brasseur, G.** (1968). Le Mali. Developing Countries of the World : National Committee for Geography, 21., Calcutta: p.257-264.
- Casenave, A. and C. Valentin** (1989). Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration. Paris : ORSTOM, 229 p.
- Denis, R., L. François, et al.** (2004). "Spatialisation de successions culturales à partir d'images HRV de spot pour une intégration dans un modèle agro-hydrologique." Télédétection vol. 4, n°3, p.231-250.
- Girard, M. C. and C. M. Girard** (1999). Traitement des données de télédétection. Paris, Dunod.
- Guyot, G.** (1989). Signatures spectrales des surfaces naturelles. Caen, Paradigme.
- Lamachere, J. M., C. Puech, et al.** (1995). Télédétection et cartographie des états de surface. Atelier Cemagref-ENGREF-ORSTOM-FAO Télédétection et Gestion des Ressources en Eau, Montpellier, 29 novembre-1er décembre 1995.
- Lamachere, J. M., C. Puech, et al.** (1995). Télédétection, états de surface et observations au sol. Atelier Cemagref-ENGREF-ORSTOM-FAO Télédétection et Gestion des Ressources en Eau, Montpellier, 29 novembre-1er décembre 1995.
- Lamachere, J. M., C. Puech, et al.** (1996). Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zone sahélienne et tropicale sèche. Colloque IAHS, L'Hydrologie Tropicale : géoscience et outil pour le développement, Paris, mai 1995.
- Mahé, G. and J.-C. Olivry** (1995). "Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989." Sécheresse n°1 vol.6: p. 109-117.
- Mahe, G., J.-E. Paturela, et al.** (2005). The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. Journal of Hydrology, vol. 300(Issue 1-4): page 33-43.
- Nonguierma, A., A. I. Mokadem, et al.** (1994). Apports de la télédétection pour la caractérisation des bas-fonds et de leur bassin versants au Sahel. Séminaire International, Bilan Hydrique et Sécheresse en Afrique Tropicale, Bamako, MLI, 9-13 décembre 1991, Paris, John Libbey Eurotext.

Oruc, M., A. M. Marangoz, et al. (12-23 July 2004 Istanbul). "Comparison of Pixel-based and Object-oriented Classification Approaches Using Landsat-7 Etm Spectral Bands." XXth ISPRS Congress: p.1118.

Puech, C., T. Cemagref Montpellier, et al. (1992). Télédétection et milieux sahéliens: 17 p.

Robin, M. (1998). La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques. Paris, Nathan.

Tappan, G. and M. McGahuey (2007). Tracking environmental dynamics and agricultural intensification in southern Mali. Agricultural Systems Vol. 94(1): p. 38-51.

Whiteside, T. and A. W (2005). A comparaison of object-oriented and pixel-based classification methods for mapping land cover in northern australia. The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute ISBN 0 9581366 2 9.

Table des tableaux

<i>Tableau 1.1 : Spécificités des images spot 1 et spot 5 utilisées.</i>	21
<i>Tableau 1.2 : Spécificités de l'image landsat 5 utilisée</i>	23
<i>Tableau 2.1 : Nomenclature de travail</i>	29
<i>Tableau 2.2 : Passage de la nomenclature de travail à la typologie de la photo-interprétation</i>	35
<i>Tableau 2.3 : Indices de qualité pour les classifications pixel à pixel</i>	52
<i>Tableau 2.3 : Indice de qualité pour les classifications pixel à pixel en fonction de la cartographie de référence</i>	54
<i>Tableau 2.4 : Paramètres appliqués pour la segmentation</i>	56
<i>Tableau 2.5 : Indice de qualité pour les classifications orientée objet</i>	59
<i>Tableau 2.6 : Indice de qualité pour les classifications orientées objet en fonction de la cartographie de référence</i>	60
<i>Tableau 2.7 : Représentation des classes « culture » et « non culture » dans la limite de la zone d'incertitude pour chaque classification</i>	62
<i>Tableau 3.1 : indice de qualité pour les seuillages testés</i>	76

Table des images

<i>Image 1.1 : Image spot 1 et spot 5</i>	22
<i>Image 1.2 : Image landsat 5</i>	23
<i>Image 1.3 : Photo aérienne</i>	24
<i>Image 1.5 : Carte topographique</i>	24
<i>Image 1.6 : MNT SRTM</i>	25

Table des cartes

<i>Carte 1.3 : Situation du bassin versant de Koumbaka</i>	18
<i>Carte 1.4 : Profil topographique du bassin versant de Koumbaka</i>	19
<i>Carte 2.1 : Echantillons de travail et de validation</i>	31
<i>Carte 2.2 : Cartographie de référence du bassin versant de Koumbaka par photo- interprétation</i>	37
<i>Carte 2.3 : Classification supervisée</i>	51
<i>Carte 2.4 : Classification orientée objet</i>	58
<i>Carte 2.5 : Classifications des images satellitaires dans la limite de la zone d'incertitude</i>	63
<i>Carte 3.1 : Zone de références établies par photo-interprétation</i>	69
<i>Carte 3.2 : Couche issue du calcul de la distance euclidienne au réseau hydrographique</i>	72
<i>Carte 3.3 : Couche issue du calcul de la distance au réseau hydrographique avec coût pondéré</i>	74

Table des figures

<i>Figure 2.1 : Ellipsoïde de distribution des données dans un espace à deux dimensions</i>	40
<i>Graphique 2.1 : Valeur moyenne en compte numérique pour l'image spot 5</i>	43
<i>Graphique 2.2 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux PIR et R.</i>	44
<i>Graphique 2.3 : Expression du NDVI et de l'IB en fonction des canaux rouge et proche infra rouge</i>	46
<i>Graphique 2.3 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux C1 et C2</i>	47
<i>Graphique 2.4 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux C2 et C3</i>	47
<i>Graphique 2.5 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe, pour les canaux PIR et MIR.</i>	48
<i>Figure 3.1 : Algorithme de calcul du logiciel</i>	71
<i>Figure 3.2 : Algorithme de calcul du logiciel</i>	73

Annexes

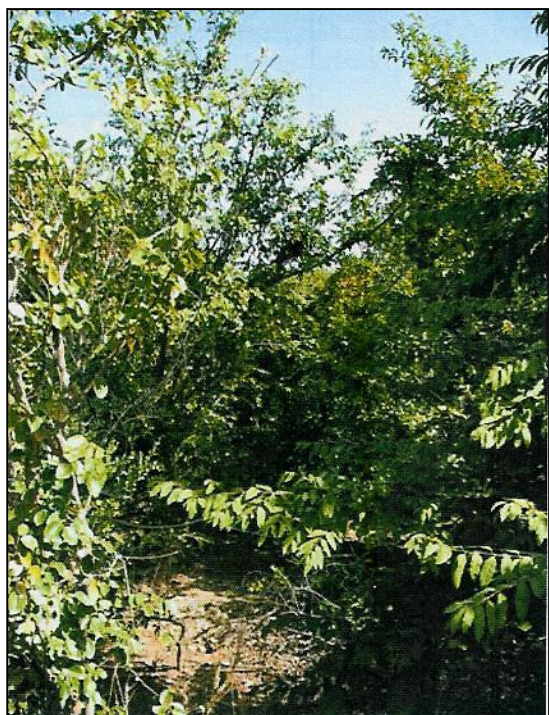
Annexe 1 : Etats de surface



Roche mère, affleurement de grès.



Sol nu



Bois



Savane arbustive



Culture récoltée



Culture sur pieds

Annexe 2 : Fiche descriptive

Fiche d'observation de terrain (mission Mali/Guinée)

Site N°: 17	Observateurs: DR - SEP	Photo(s): <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON	Point GPS: X: 367 952 Y: 154 836 Z:
Date: 14/11	N°1: 82 N°2: 83 N°3: 84 N°4: 85		
Relief: <input type="checkbox"/> Plaine <input type="checkbox"/> Plateau <input type="checkbox"/> Replat <input type="checkbox"/> Dépression <input type="checkbox"/> Crête <input type="checkbox"/> Haut-versant <input type="checkbox"/> Mi-versant <input type="checkbox"/> Bas-versant <input type="checkbox"/> Vallée <input type="checkbox"/> Gorge <input type="checkbox"/> Terrasse <input type="checkbox"/> Cuvette <input type="checkbox"/> Autre:		Classe thématique temporaire: <input type="checkbox"/> (1) Forêt humide <input type="checkbox"/> (2) Forêt mi-humide <input type="checkbox"/> (3) Forêt sèche <input type="checkbox"/> (4) Savane arborée <input type="checkbox"/> (5) Savane arbustive <input type="checkbox"/> (6) Steppe <input type="checkbox"/> (7) Steppe dégradée <input checked="" type="checkbox"/> (8) Sol nu <input type="checkbox"/> (9) Roche-mère <input type="checkbox"/> (10) Prairie pâturée <input type="checkbox"/> (11) Jachère <input type="checkbox"/> (12) Culture <input type="checkbox"/> (13) Eau <input type="checkbox"/> (14) Urbain <input type="checkbox"/> (15) Autre:	
SOL Note: La somme des % de recouvrement des états de surface sol et végétation cachant le sol est égale à 100%. Les strates de végétation supérieures sont comptées en plus.		VEGETATION	
% de recouvrements des états de surface: 10 Veg. Rec. global (%): 40 Pierres (> 20 mm): 50 Graviers (2-20 mm): <input type="checkbox"/> Sol Meuble: Couleur: Résidu vég.:		Type de formation végétale: <input type="checkbox"/> (LHD) Ligneuse haute dense <input type="checkbox"/> (LHC) Ligneuse haute claire <input type="checkbox"/> (LHB) Ligneuse haute et basse <input type="checkbox"/> (LB) Ligneuse basse <input type="checkbox"/> (HLH) Herbacée et ligneuse haute <input type="checkbox"/> (HLHB) Herbacée et ligneuse haute et basse <input type="checkbox"/> (HLB) Herbacée et ligneuse basse <input type="checkbox"/> (H) Herbacée <input type="checkbox"/> (VC) A végétation claire <input type="checkbox"/> (VTC) A végétation très claire <input checked="" type="checkbox"/> (SN) Sol nu <input type="checkbox"/> (CU) Culture: <input type="checkbox"/> (AUT) Autre:	
Présence croûte/Pell. battance <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non (NB: Couleur qualitative: Beige, Brun, Gris, Rouge, Jaune, etc.)		Espèces dominantes: <i>Si pas connues</i> (A)rborecente, (A)rbustive, (B)uisson, (H)erbacée, (C)ulture	
Type de sol: <input type="checkbox"/> (FO) Forestier <input type="checkbox"/> (AL) Argilo-limoneux <input type="checkbox"/> (SF) Sable fin <input type="checkbox"/> (SG) Sable grossier <input checked="" type="checkbox"/> (GR) Gravillonnaire <input checked="" type="checkbox"/> (CA) Caillouteux <input type="checkbox"/> (PI) Pierreux <input type="checkbox"/> (BL) A blocs <input type="checkbox"/> (AU) Autre:		Structure: Recouvrement % ↳ Hauteur (cm)	
Mésosfaune: <input checked="" type="checkbox"/> Non observée <input type="checkbox"/> Termites <input type="checkbox"/> Fourmis <input type="checkbox"/> Vers <input type="checkbox"/> Autre:		Structure: Strate 1: B Strate 2: H Strate 3: Strate 4:	
Humidité du sol: <input checked="" type="checkbox"/> (Sec) <input type="checkbox"/> Peu humide (PH) <input type="checkbox"/> (Humide) <input type="checkbox"/> Très humide (TH) <input type="checkbox"/> (Saturé)		Structure: Recouvrement % ↳ Hauteur (cm)	
Traces d'érosion: <input type="checkbox"/> Hydrique <input type="checkbox"/> Eolienne		ANTHROPISATION	
		Utilisation: <input type="checkbox"/> Aucune utilisation agricole <input type="checkbox"/> Utilisation pastorale <input type="checkbox"/> Utilisation forestière	
		Intervention: <input type="checkbox"/> récente <input type="checkbox"/> ancienne/continue <input type="checkbox"/> ancienne/discontinue	
		Type d'intervention: <input type="checkbox"/> Déboisement <input type="checkbox"/> Brûlis <input type="checkbox"/> Pâturage: <input type="checkbox"/> A plat (daba) <input type="checkbox"/> Billonnage (sillons) <input type="checkbox"/> Buttage (zaï) <input type="checkbox"/> Sarclage <input type="checkbox"/> Paillage	
		Irrigation: <input type="checkbox"/> (N)on irrigué <input type="checkbox"/> (A)spersion <input type="checkbox"/> (Gr)avitare (séguia) <input type="checkbox"/> (Go)utte à goutte <input type="checkbox"/> Autre:	
Commentaires: Zone de sol non gravillonnaire à caillouteux sur colline Ves pt 18: photo d 1 ravine 86 — d 1 troupeau 87			

113/170

Fiche_terrain.doc

03/02/06

Annexe 3 : Valeurs moyennes en compte numérique

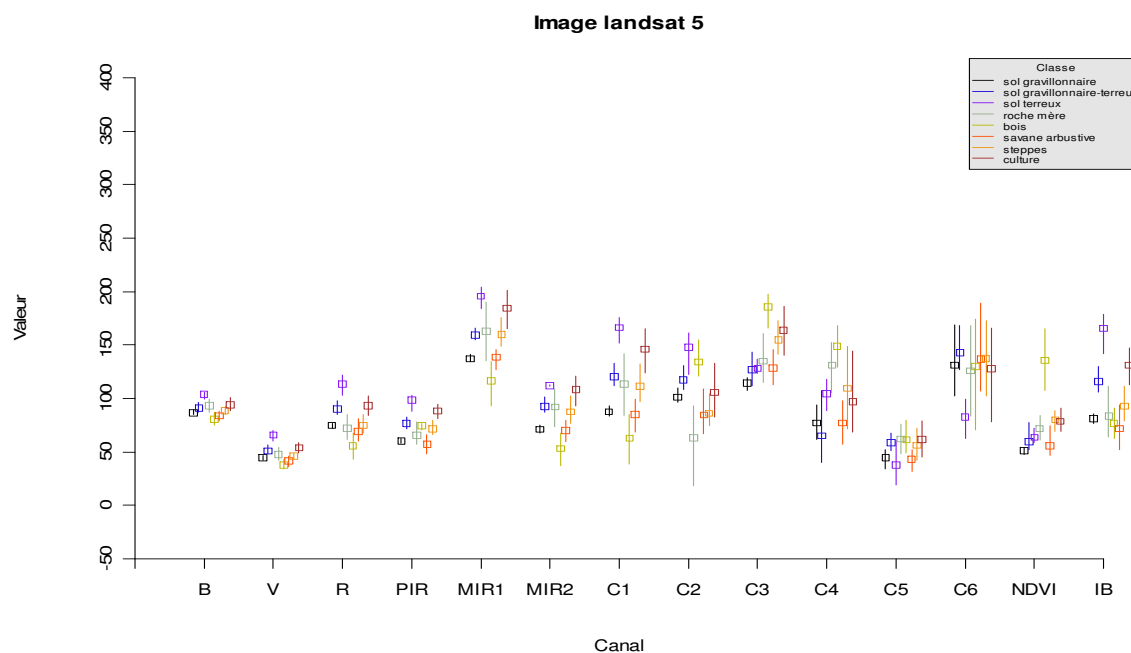
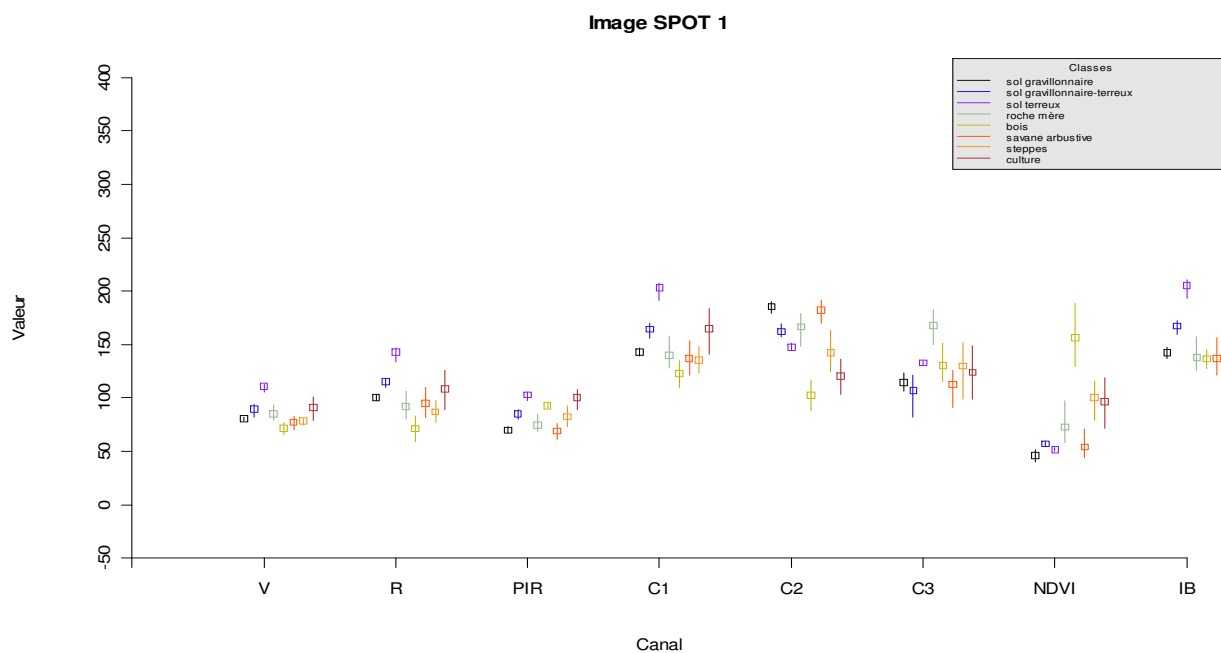
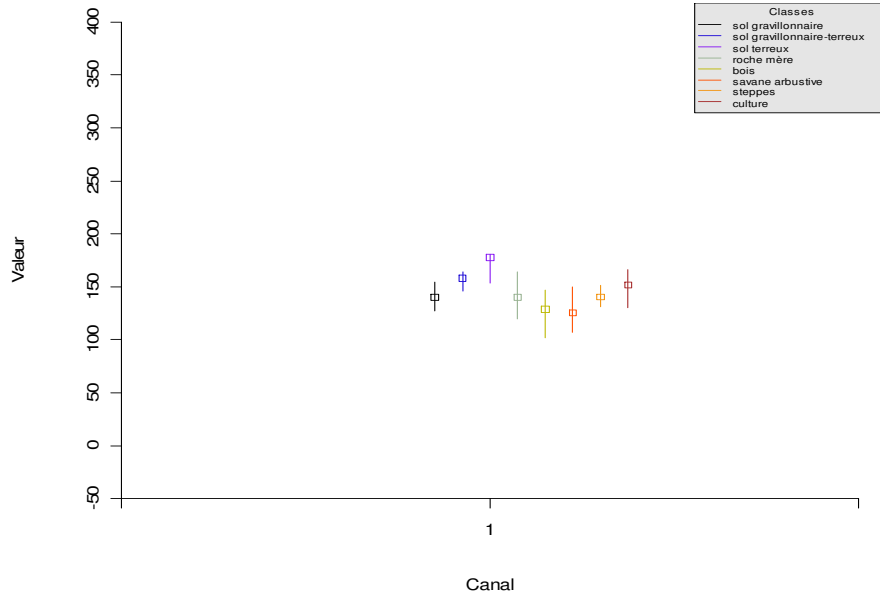
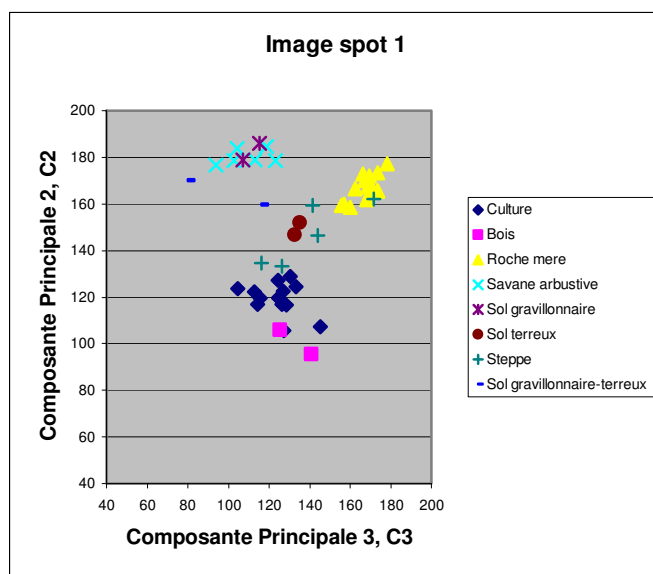
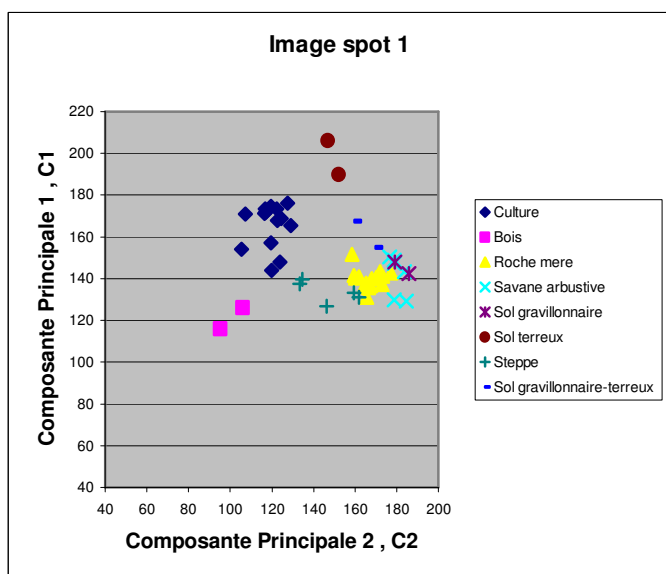
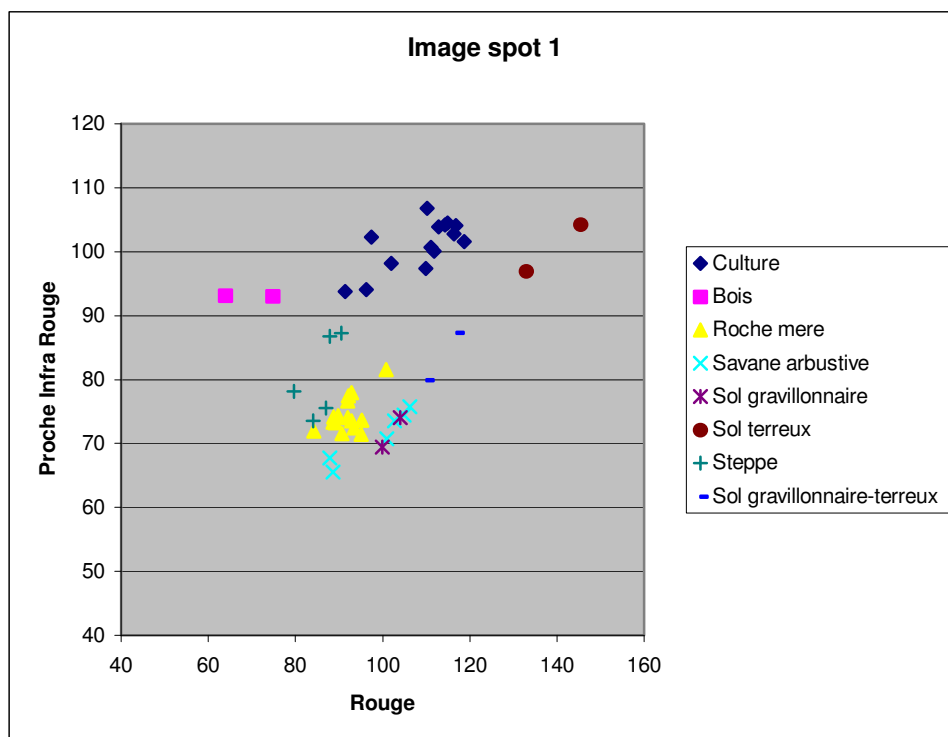
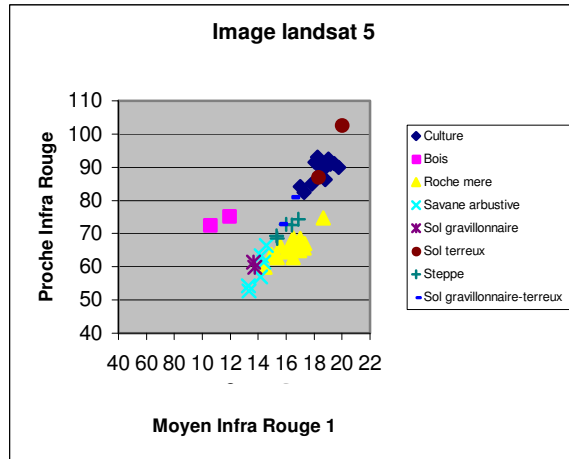
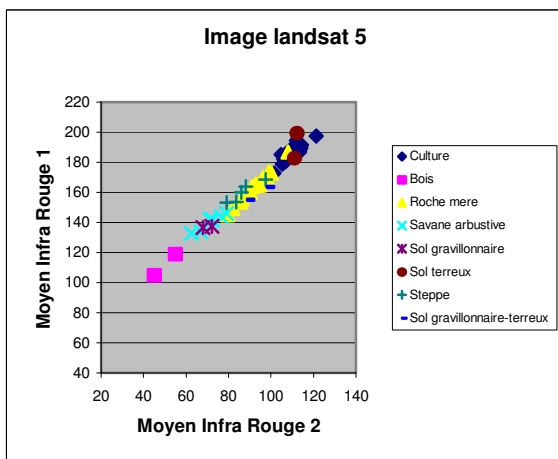
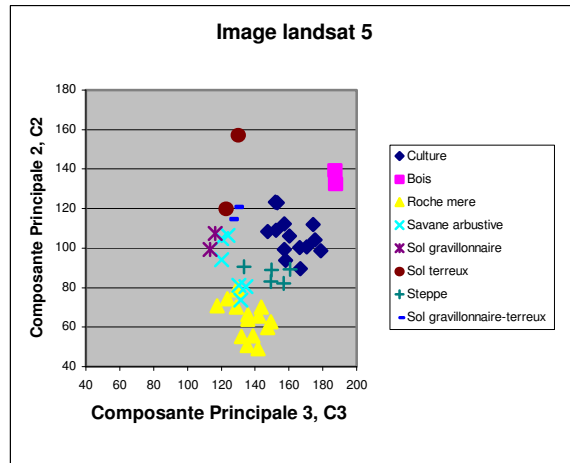
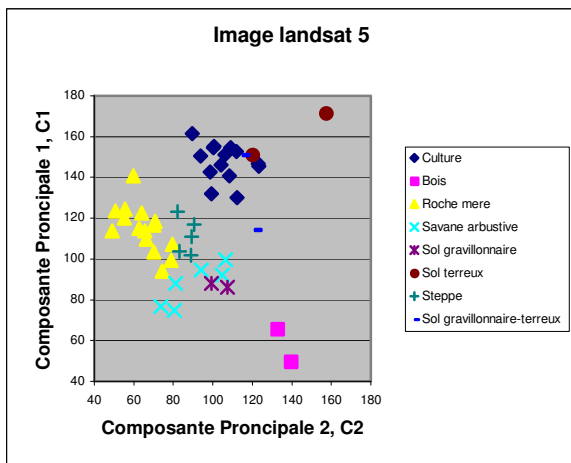
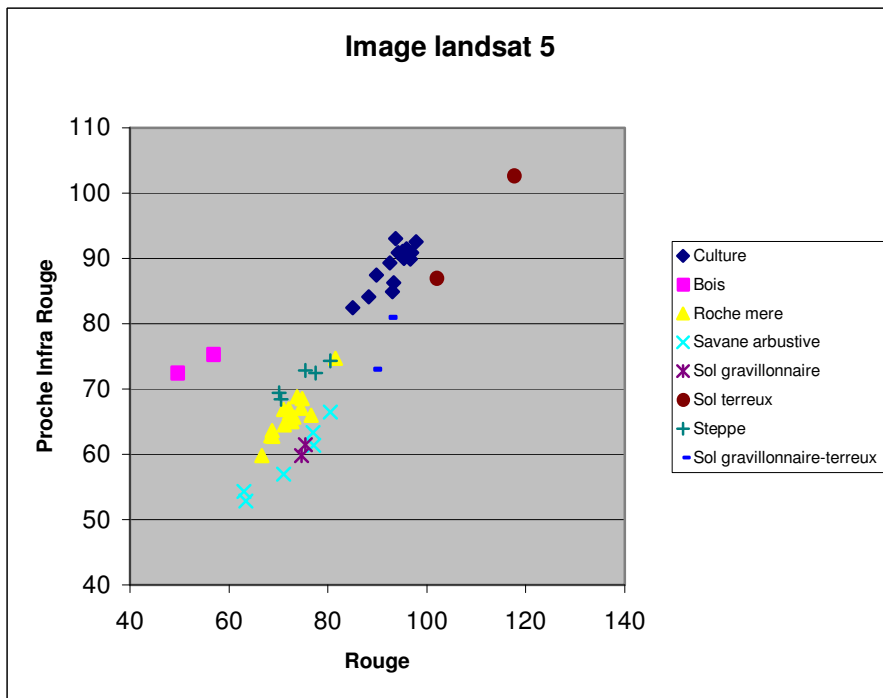


Photo aérienne



Annexe 4 : Valeurs moyennes pour chaque échantillon de travail regroupés par classe





Annexe 5 : Matrice confusion pixel à pixel

Landsat 5								
Classes	Culture	Sol nu avec mois de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	TOTAL	Précision réalisateur
Culture	137,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	139	98,6
Sol nu avec mois de 10% de végétation	0,0	11,0	9,0	0,0	0,0	0,0	20	55,0
Savane arbustive	0,0	2,0	4,0	0,0	0,0	1,0	7	57,1
Steppe	2,0	1,0	0,0	63,0	0,0	1,0	67	94,0
Forêt	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	10	100,0
Roche mère	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	147,0	152	96,7
Total	139,0	14,0	13,0	70,0	10,0	149,0	395	
Précision utilisateur	98,6	78,6	30,8	90,0	100,0	98,7	0	

Précision globale	94,2
Indice de Kappa	94,2

Spot 1								
Classes	Culture	Sol nu avec mois de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	TOTAL	Précision réalisateur
Culture	304,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	307	99,0
Sol nu avec mois de 10% de végétation	0,0	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	5	40,0
Savane arbustive	0,0	6,0	9,0	0,0	0,0	0,0	15	60,0
Steppe	3,0	0,0	0,0	149,0	0,0	7,0	159	93,7
Forêt	0,0	0,0	0,0	0,0	22,0	0,0	22	100,0
Roche mère	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	341,0	346	98,6
Total	307,0	8,0	12,0	154,0	24,0	349,0	854	
Précision utilisateur	99,0	25,0	75,0	96,8	91,7	97,7	0	

Précision globale	96,8
Indice de Kappa	96,8

Spot 5								
Classes	Culture	Sol nu avec mois de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	TOTAL	Précision réalisateur
Culture	1203	1	0	21	4	1	1230	97,8
Sol nu avec mois de 10% de végétation	0	10	7	0	0	0	17	58,8
Savane arbustive	1	2	54	3	1	0	61	88,5
Steppe	309	2	0	312	0	14	637	49,0
Forêt	0	0	0	0	83	0	83	100,0
Roche mère	0	9	0	31	0	1360	1400	97,1
Total	1513	24	61	367	88	1375	3428	
Précision utilisateur	79,5	41,7	88,5	85,0	94,3	98,9	0	

Précision globale	88,2
Indice de Kappa	88,1

Photo aérienne								
Classes	Culture	Sol nu avec mois de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	TOTAL	Précision réalisateur
Culture	4275,0	733,0	439,0	4970,0	65,0	3159,0	13641	31,3
Sol nu avec mois de 10% de végétation	17,0	16,0	33,0	25,0	11,0	106,0	208	7,7
Savane arbustive	18,0	20,0	39,0	95,0	1,0	499,0	672	5,8
Steppe	768,0	971,0	856,0	2072,0	2,0	2387,0	7056	29,4
Forêt	67,0	28,0	314,0	89,0	137,0	301,0	936	14,6
Roche mère	5297,0	1134,0	1151,0	1578,0	359,0	5893,0	15412	38,2
Total	10442,0	2902,0	2832,0	8829,0	575,0	12345,0	37925	
Précision utilisateur	40,9	0,6	1,4	23,5	23,8	47,7	0	

Précision globale	32,8
Indice de Kappa	24,2

Annexe 6 : Matrice de confusion avec référence pixel à pixel

Landsat 5								
Classes	Culture	Sol nu avec mois de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	37817,0	2697,0	172,0	6509,0	4144,0	561,0	51900	72,9
Sol nu avec mois de 10% de végétation	8588,0	15246,0	6351,0	7968,0	717,0	1303,0	40173	38,0
Savane arbustive	14,0	482,0	1333,0	317,0	15,0	246,0	2407	55,4
Steppe	9841,0	1260,0	154,0	7270,0	131,0	209,0	18865	38,5
Forêt	490,0	308,0	79,0	1352,0	1950,0	69,0	4248	45,9
Roche mère	17813,0	9956,0	565,0	31254,0	2043,0	24298,0	85929	28,3
Total	74563,0	29949,0	8654,0	54670,0	9000,0	26686,0	203522	
Précision utilisateur	50,7	50,9	15,4	13,3	21,7	91,1	0	

Précision globale	43,2
Indice de Kappa	39,3

Spot 1								
Classes	Culture	Sol nu avec mois de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	73001,0	4506,0	148,0	16082,0	15992,0	7231,0	116960	62,4
Sol nu avec mois de 10% de végétation	6870,0	33355,0	19067,0	15267,0	2005,0	15227,0	91791	36,3
Savane arbustive	3,0	847,0	3546,0	1325,0	14,0	599,0	6334	56,0
Steppe	11496,0	7546,0	1083,0	17736,0	727,0	4289,0	42877	41,4
Forêt	993,0	95,0	24,0	3274,0	4127,0	1044,0	9557	43,2
Roche mère	8045,0	1928,0	287,0	41042,0	6280,0	135851,0	193433	70,2
Total	100408,0	48277,0	24155,0	94726,0	29145,0	164241,0	460952	
Précision utilisateur	72,7	69,1	14,7	18,7	14,2	82,7	0	

Précision globale	58,1
Indice de Kappa	56,1

Spot 5								
Classes	Culture	Sol nu avec mois de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	349252,0	15990,0	4719,0	51422,0	42491,0	3525,0	467399	74,7
Sol nu avec mois de 10% de végétation	76779,0	172054,0	51991,0	41986,0	9762,0	14459,0	367031	46,9
Savane arbustive	122,0	4081,0	16269,0	1875,0	1016,0	1919,0	25282	64,4
Steppe	77578,0	12608,0	1452,0	73236,0	2440,0	3995,0	171309	42,8
Forêt	5143,0	846,0	827,0	4683,0	26282,0	428,0	38209	68,8
Roche mère	192779,0	121852,0	7004,0	130645,0	28129,0	293443,0	773852	37,9
Total	701653,0	327431,0	82262,0	303847,0	110120,0	317769,0	1843082	
Précision utilisateur	49,8	52,5	19,8	24,1	23,9	92,3	0	

Précision globale	50,5
Indice de Kappa	48,0

Annexe 7 : Matrice de confusion orientée objet

Landsat 5								
Classes	Culture	Sol nu avec moins de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	139,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	139	100,0
Sol nu avec moins de 10% de végétation	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	20	0,0
Savane arbustive	0,0	1,0	6,0	0,0	0,0	0,0	7	85,7
Steppe	0,0	0,0	0,0	63,0	0,0	4,0	67	94,0
Forêt	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	10	100,0
Roche mère	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	152,0	152	100,0
Total	139,0	1,0	26,0	63,0	10,0	156,0	395	
Précision utilisateur	100,0	0,0	23,1	100,0	100,0	97,4	0	

Précision globale	93,7
Indice de Kappa	93,7

Spot 1								
Classes	Culture	Sol nu avec moins de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	303,0	0,0	0,0	3,0	0,0	1,0	307	98,7
Sol nu avec moins de 10% de végétation	0,0	2,0	3,0	0,0	0,0	0,0	5	40,0
Savane arbustive	1,0	2,0	12,0	0,0	0,0	0,0	15	80,0
Steppe	0,0	0,0	0,0	152,0	0,0	7,0	159	95,6
Forêt	0,0	0,0	0,0	0,0	22,0	0,0	22	100,0
Roche mère	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	346,0	346	100,0
Total	304,0	4,0	15,0	155,0	22,0	354,0	854	
Précision utilisateur	99,7	50,0	80,0	98,1	100,0	97,7	0	

Précision globale	98,0
Indice de Kappa	98,0

Spot 5								
Classes	Culture	Sol nu avec moins de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	1076,0	0,0	0,0	152,0	0,0	2,0	1230	87,5
Sol nu avec moins de 10% de végétation	0,0	2,0	15,0	0,0	0,0	0,0	17	11,8
Savane arbustive	0,0	14,0	47,0	0,0	0,0	0,0	61	77,0
Steppe	0,0	0,0	0,0	617,0	0,0	20,0	637	96,9
Forêt	0,0	0,0	0,0	0,0	83,0	0,0	83	100,0
Roche mère	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1400,0	1400	100,0
Total	1076,0	16,0	62,0	769,0	83,0	1422,0	3428	
Précision utilisateur	100,0	12,5	75,8	80,2	100,0	98,5	0	

Précision globale	94,1
Indice de Kappa	94,1

Photo aérienne								
Classes	Culture	Sol nu avec moins de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	8513,0	1808,0	339,0	581,0	899,0	1501,0	13641	62,4
Sol nu avec moins de 10% de végétation	20,0	39,0	0,0	94,0	0,0	55,0	208	18,8
Savane arbustive	89,0	12,0	105,0	466,0	0,0	0,0	672	15,6
Steppe	2837,0	526,0	109,0	3531,0	10,0	43,0	7056	50,0
Forêt	408,0	0,0	243,0	182,0	87,0	16,0	936	9,3
Roche mère	6643,0	3284,0	934,0	2109,0	1622,0	820,0	15412	5,3
Total	18510,0	5669,0	1730,0	6963,0	2618,0	2435,0	37925	
Précision utilisateur	46,0	0,7	6,1	50,7	3,3	33,7	0	

Précision globale	34,5
Indice de Kappa	29,1

Annexe 8 : Matrice de confusion avec référence orientée objet

Landsat 5								
Classes	Culture	Sol nu avec moins de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	33536,0	1549,0	24,0	9228,0	3497,0	3858,0	51692	64,9
Sol nu avec moins de 10% de végétation	6539,0	17196,0	6670,0	5553,0	325,0	3887,0	40170	42,8
Savane arbustive	79,0	314,0	1702,0	169,0	4,0	139,0	2407	70,7
Steppe	5500,0	1612,0	47,0	9961,0	85,0	1661,0	18866	52,8
Forêt	451,0	129,0	48,0	1716,0	1881,0	22,0	4247	44,3
Roche mère	11227,0	5804,0	1178,0	18614,0	1347,0	47759,0	85929	55,6
Total	57332,0	26604,0	9669,0	45241,0	7139,0	57326,0	203311	
Précision utilisateur	58,5	64,6	17,6	22,0	26,3	83,3	0	

Précision globale	55,1
Indice de Kappa	52,8

Spot 1								
Classes	Culture	Sol nu avec moins de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	66746,0	2612,0	14,0	30416,0	11589,0	5520,0	116897	57,1
Sol nu avec moins de 10% de végétation	7983,0	35703,0	14246,0	15207,0	669,0	17983,0	91791	38,9
Savane arbustive	35,0	486,0	4120,0	988,0	1,0	704,0	6334	65,0
Steppe	11346,0	7303,0	60,0	18928,0	532,0	4708,0	42877	44,1
Forêt	1610,0	88,0	31,0	3405,0	3404,0	1019,0	9557	35,6
Roche mère	4930,0	811,0	335,0	21103,0	6578,0	159676,0	193433	82,5
Total	92650,0	47003,0	18806,0	90047,0	22773,0	189610,0	460889	
Précision utilisateur	72,0	76,0	21,9	21,0	14,9	84,2	0	

Précision globale	62,6
Indice de Kappa	61,3

Spot 5								
Classes	Culture	Sol nu avec moins de 10% de végétation	Savane arbustive	Steppe	Forêt	Roche mère	Total	Précision réalisateur
Culture	291376,0	30822,0	1769,0	76240,0	42313,0	21114,0	463634	62,8
Sol nu avec moins de 10% de végétation	39108,0	197914,0	44705,0	13043,0	8452,0	63048,0	366270	54,0
Savane arbustive	117,0	2230,0	19976,0	187,0	377,0	2358,0	25245	79,1
Steppe	36427,0	15586,0	993,0	93627,0	1436,0	22503,0	170572	54,9
Forêt	4636,0	2372,0	94,0	95,0	29163,0	1765,0	38125	76,5
Roche mère	41499,0	34058,0	7562,0	75413,0	21891,0	593367,0	773790	76,7
Total	413163,0	282982,0	75099,0	258605,0	103632,0	704155,0	1837636	
Précision utilisateur	70,5	69,9	26,6	36,2	28,1	84,3	0	

Précision globale	66,7
Indice de Kappa	65,7