



Académie de Toulouse

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse

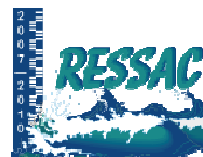
DAA AGRO-GEOMATIQUE

« **S**cience de l'**I**nformation **G**éoréférencée pour la **M**aitrise de
l'environnement et l'**A**ménagement des territoires » (**SIGMA**)

RAPPORT DE STAGE

**ANALYSE DE SERIES TEMPORELLES
D'IMAGES SATELLITE
A BASSE RESOLUTION SPATIALE
POUR LA DETECTION DES CHANGEMENTS
D'OCCUPATION DU SOL AU MALI**

VINTROU Elodie



Septembre 2008

Remerciements

En préambule à ce rapport, je souhaite adresser ici tous mes remerciements aux personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce stage, et particulièrement à Agnès Bégué, mon maître de stage, pour le temps et l'énergie qu'elle m'a consacrés durant ces 6 mois qui ont été très formateurs.

J'aimerais remercier également Christian Puech, mon deuxième encadrant, pour ses explications précieuses sur les aspects hydrologiques et pour sa disponibilité.

Je remercie Denis Ruelland, pour le suivi de ce stage et du projet, le temps consacré au démarrage, et les corrections de ce rapport.

Je remercie également Nadine Dessay, pour le temps qu'elle m'a accordé ainsi que pour les moments et les données partagés !

Je tiens à remercier mon tuteur enseignant David Sheeren ainsi que Jean-Paul Lacombe, pour leur disponibilité, leur écoute et leurs conseils avisés.

Plus généralement, je remercie toutes les personnes de la Maison de la Télédétection, stagiaires, thésards ou chercheurs qui ont participé de près ou de loin à mon intégration au sein de la structure et pour le temps qu'elles ont pu m'accorder. Je pense à particulier à Fanny, sans qui mon stage à la MTD n'aurait pas été le même !

Et enfin, un grand merci à Mari, pour toutes nos discussions constructives et tous ces moments partagés...

Résumé

L'espace soudano-sahélien apparaît comme un milieu particulièrement vulnérable, soumis à des évolutions majeures dues aux changements climatiques et anthropiques. L'étude de l'impact de ces changements sur les ressources en eau y est une urgence régionale. L'amélioration des modèles hydrologiques existants nécessite une meilleure prise en compte de la dynamique des milieux.

L'objectif général de cette étude est la caractérisation de la dynamique des états de surface en tant que variable de modèles hydrologiques. Cette caractérisation passe par le développement d'une méthode de suivi de l'occupation du sol à l'échelle d'un bassin versant sahélien. Le site expérimental est le bassin du Bani qui occupe une surface de 130 000 km².

Pour cela, deux approches originales ont été testées sur des jeux de données satellitaires acquis par des capteurs à large champ: une analyse de l'indice de végétation NDVI (1982-2006, NOAA-AVHRR à 8 km de résolution), et une analyse d'indices de texture (2001-2006, TERRA-MODIS à 250 m). L'évolution de ces indices a été confrontée aux données de pluies disponibles sur le bassin.

Les premiers résultats montrent que le concept d'efficacité pluviométrique (relation entre NDVI et pluie) pourrait être utilisé pour l'étude de la dynamique des états de surface à basse résolution. Concernant l'approche texturale, les résultats sont plus difficiles à interpréter en raison de la difficulté à obtenir des images journalières dégagées dans le sud du bassin. Les analyses de texture devront être réitérées sur un plus grand nombre d'images sans nuage, et avec un recul temporel plus important.

***Mots-clés:** Télédétection, Afrique de l'ouest, Occupation du sol, Basse Résolution, Indices de végétation, Texture.

Abstract

The Soudano-sahelian area appears as a particularly vulnerable environment, subjected to major evolutions due to climate and anthropologic changes. The study of the impact of these changes on water resources is thus a regional urgency. To improve the existing hydrological models, it is necessary to take into account the dynamics of the land-cover.

The general objective of this study is to characterize the dynamics of the land-cover as a variable of hydrological models. This characterization needs the development of a method for the monitoring of land cover at the sahelian watershed scale. The experimental site is the Bani watershed which surface is 130 000 km².

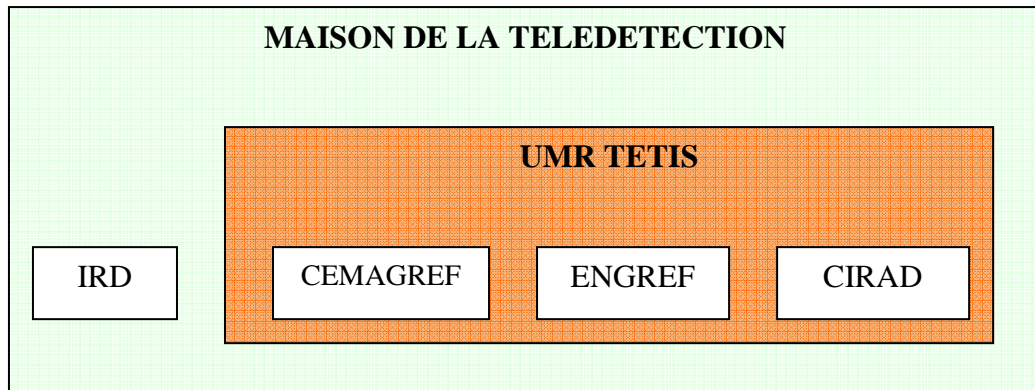
For that, two original approaches were tested on different sets of satellite data acquired by large field sensors: an analysis of vegetation index NDVI (1982-2006, NOAA-AVHRR, resolution of 8 km), and an analysis of texture indicators (2001-2006, TERRA-MODIS, resolution of 250 m). The evolution of these indicators was confronted to the rainfall data available on the watershed.

The first results show that, the concept of rain use efficiency (relation between NDVI and rainfall) could be used for the study of land-cover change at low resolution. Concerning the textural approach, the results are more difficult to interpret due to the difficulty to obtain daily images without cloud in the South of the Bani. The analysis of texture must be repeated on a large number of images without cloud, and with a more important temporal resolution.

***Keywords:** Remote Sensing, West Africa, Land-cover and Land use, Low resolution, Vegetation indices, Texture.

Avant-Propos

Ce stage s'est déroulé à la Maison de la Télédétection à Montpellier qui regroupe au sein de l'Unité Mixte de Recherche TETIS (Territoires, Environnement, télédétection et Informations Spatiales) les équipes de 3 organismes de recherche scientifique, le Cemagref¹, AgroParisTech² et le CIRAD³



L'objectif général de l'UMR TETIS est de produire, développer, diffuser et transférer des connaissances, des théories et des méthodes permettant (1) de décrire et comprendre les structures et dynamiques spatio-temporelles des écosystèmes, des espaces ruraux et des territoires, (2) de maîtriser l'information spatiale au service des démarches de connaissance, de gestion agri-environnementale et de développement territorial.

¹ Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts. www.cemagref.fr

² Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (www.agroparistech.fr/).

³ Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. www.cirad.fr

SOMMAIRE

Introduction	1
Partie 1 : Une étude au sein du projet RESSAC	2
1.1. Présentation du projet RESSAC	2
1.2. Analyse bibliographique	5
1.3. Démarche scientifique pour notre étude	9
Partie 2 : Acquisition et pré-traitements des données	12
2.1. Zone d'étude	12
2.1.1. Présentation	12
2.1.2. Segmentation de la zone	13
2.2. Acquisition et préparation des images	16
2.2.1. Généralités	16
2.2.2. Produits sélectionnés	17
2.2.3. Acquisition et pré-traitements	18
2.3. Les données de pluies	21
Partie 3 : Traitements des données	22
3.1. Extraction du NDVI	22
3.2. Calcul du Coefficient d'Efficacité Pluviométrique (CEP)	22
3.3. Analyses de texture MODIS	23
3.3.1. Bases théoriques	23
3.3.2. Choix des indices et des paramètres	25
3.3.3. Choix du jeu de données	26
Partie 4 : Résultats et discussions	27
4.1. Résultats NDVI-pluies	27
4.1.1. Evolution Pluies	27
4.1.2. Evolution NDVI	28
4.1.3. Relation NDVI-pluies	30
4.1.4. Efficience pluviométrique	34
4.2. Résultats de l'analyse texturale	41
4.3. Analyse de l'évolution de l'OS ? Bilans et perspectives	44
4.3.1. Relations Pluies/NDVI	44
4.3.2. Texture	45
Conclusion	47

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Bani	3
Figure 2 : Evolution des états de surface au sein des 3 bassins expérimentaux : cas des cultures et milieux ligneux.	4
Figure 3 : Schéma de la méthode MC	6
Figure 4 : Spectres de réflectance, d'absorptance et de transmittance pour un végétal chlorophyllien.	7
Figure 5 : Valeurs annuelles moyennes du coefficient d'efficacité pluviale sur le bassin méditerranéen de 1982 à 1996, selon des valeurs croissantes de pluviométrie annuelle moyenne	9
Figure 6 : Démarche et méthodologie pour l'approche 1 : images NOAA-AVHRR (et SPOT4-VEGETATION) et indice de végétation.	10
Figure 7 : Démarche et méthodologie pour l'approche 2 : images MODIS et indices de texture.	11
Figure 8 : Carte d'occupation du sol du Bani en 2000	12
Figure 9 : Segmentation du Bani en sept sous-bassins versants, sur fond de composition colorée de l'image MODIS-TERRA du 29 décembre 2007.....	13
Figure 10 : Délimitation de trois paysages du Bani, sur fond de composition colorée de l'image MODIS-TERRA du 29 décembre 2007.	14
Figure 11 : Photographies des milieux rencontrés sur le site de Madina	15
Figure 12 : Photographies des milieux rencontrés sur le site de Koumbaka	15
Figure 13 : Stations pluviométriques du bassin du Bani	21
Figure 14 : Principe de construction de la matrice de cooccurrence	24
Figure 15 : Fenêtre mobile pour le calcul d'indice de texture.	25
Figure 16 : Exemple d'un indice de variance calculé sous ENVI.	26
Figure 17 : $(P_i - P_{moy})/Ecartype$, en moyenne de pluies annuelles sur les 17 stations du Bani choisies pour l'étude.	27
Figure 18 : Pluviométrie annuelle par sous bassins du Bani	28
Figure 19 : Evolution du NDVI moyen par sous bassin-versant, moyenne annuelle sur la période 1982-2006.....	28
Figure 20 : Evolution du NDVI moyen par sous-bassin, moyenne mensuelle sur la période 1982- 2006.....	29
Figure 21 : Variation saisonnière du NDVI et des pluies par sous-bassins. (a) sous-bassin 1 et (b) sous-bassin 7.	30
Figure 22 : Variation saisonnière du NDVI et des pluies par type de paysages.....	31
Figure 23 : Evolution du NDVI mensuel en fonction des pluies mensuelles, par type de paysage..	32
Figure 24 : NDVI en fonction des pluies par sous bassins, décalage d'un mois.....	33
Figure 25 : Modélisation des relations pluies-NDVI par sous-bassin avec décalage d'un mois	34
Figure 26 : Efficience annuelle par paysage, en fonction des pluies, méthode 1	35
Figure 27 : Efficience annuelle par paysage, en fonction des pluies, méthode 2.....	35
Figure 28 : Efficience pluviométrique annuelle, par paysage avant normalisation par la pluie.	36
Figure 29 : Efficience pluviométrique annuelle normalisée, par paysage.....	36
Figure 30 : Evolution de l'efficience pluviométrique de 1982 à 2006 sur le bassin du Bani ..	37
Figure 31 : Efficience pluviométrique mensuelle en fonction des pluies, par paysage	38
Figure 32 : Efficience pluviométrique en fonction des pluies, pas de temps mensuel, par paysage. Période 1 = jusqu'à la plus grosse pluie. Période 2 = décroissance des pluies.	39

Figure 33 : Modélisation de l'efficacité par paysage en fonction de la pluviométrie sur la période 1, période de croissance.....	39
Figure 34 : Evolution de l'indice de variance par sous-bassin du Bani au cours de l'année 2001	41
Figure 35 : Evolution de l'indice de variance par paysage au cours de l'année 2001.....	42
Figure 36 : Evolution de l'indice de variance par paysage au cours de l'année 2006.....	42
Figure 37 : Composition colorée (PIR, R, R) et image de variance pour le paysage 3 : 5 février 2006 et 26 décembre 2006.....	43
Tableau 1 : Sites et paramètres de téléchargement.....	20
Tableau 2 : Choix des stations par sous-bassin	21
Tableau 3 : Augmentation du NDVI par sous-bassin entre 1982 et 2006.....	29
Tableau 4 : Modélisation sous R : relations pluies-NDVI avec décalage d'un mois	33

Introduction

En 2007, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) a rendu un rapport alarmant sur les conséquences du réchauffement climatique. Il estime que d'ici 2080, jusqu'à 3,2 milliards d'humains seront exposés à des pénuries d'eau sévères et 600 millions à la faim en raison des sécheresses, de la dégradation et de la salinisation des sols.

L'Afrique est au premier rang des régions concernées par la question de l'impact des fluctuations climatiques sur les ressources en eau. Plus des 2/3 du continent sont localisés entre les tropiques, et les grandes sécheresses qui ont frappé le Sahel en 1972-1973 et en 1984-1985 ont eu des conséquences dramatiques et durables pour les populations.

Devant ces évolutions climatiques, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de ce milieu aride et ses dynamiques afin de préserver les ressources naturelles et de prévoir des mesures d'adaptation à ces changements.

Pour mieux comprendre la dynamique de l'eau dans ces régions, le projet ANR RESSAC, mis en place depuis 2 ans, s'intéresse à un bassin versant soudano-sahélien, le Bani. L'objectif du projet est de déterminer les effets conjugués des changements climatiques et environnementaux sur les ressources en eau puis d'élaborer des scénarii climatiques, environnementaux et socio-économiques pour évaluer les impacts possibles sur les ressources en eau à moyen terme (2050). Les conditions de ruissellement et d'écoulement étant très dépendantes de l'occupation du sol, il a été envisagé, dans le but d'améliorer les modèles hydrologiques, de prendre en compte la dynamique des milieux.

La télédétection apparaît être un très bon outil pour caractériser les états de surface sur de grands espaces, et a largement été utilisée pour les milieux sahéliens (Tappan *et al.*, 2000 ; Tottrup *et al.*, 2003 ; Ruelland *et al.*, 2008). Une banque d'images satellites a été constituée depuis la mise en orbite de satellites d'observation de la Terre dans les années 1970, et il est aujourd'hui possible de les utiliser pour le suivi de l'occupation du sol.

Dans le cadre du projet RESSAC, l'objectif de cette étude est de développer une méthode pour suivre l'évolution de l'occupation du sol du Bani, par télédétection, de 1980 à aujourd'hui. Nous présenterons dans une première partie une description du projet RESSAC, un état de l'art des méthodes de suivi de l'occupation du sol et la démarche scientifique que nous avons adoptée. La deuxième partie sera consacrée à la présentation de la zone d'étude, des données utilisées et des prétraitements effectués. La troisième partie rendra compte des traitements réalisés. Les résultats et l'apport des méthodes testées pour le suivi de l'occupation du sol seront abordés dans une quatrième partie.

Partie 1 : Une étude au sein du projet RESSAC

1.1. Présentation du projet RESSAC

Le projet RESSAC, vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme, financé par l'Agence Nationale de la Recherche, a démarré en 2006. Il sera piloté jusqu'en 2010 par l'équipe MOHYCAN (Modélisation Hydrologique, Climat et Anthropisation des grands cours d'eau) du Laboratoire HydroSciences de Montpellier (HSM). Les participants sont nombreux et sont issus de différentes structures : HSM, CIRAD, Cemagref, IRD⁴, CNRS⁵ ...

Le Sahel ne possède que très peu de moyens pour faire face aux changements globaux du fait de sa très faible capacité d'adaptation à l'évolution du climat.

L'impact sur les ressources en eau est très complexe. En dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale, on remarque au Sahel une augmentation des coefficients d'écoulement sur certains hydrosystèmes. Ce paradoxe peut être expliqué par la baisse progressive des « gros événements », c'est à dire que les grosses pluies sont moins fréquentes. Ce phénomène provoque une modification des états de surface. Il s'en suit une imperméabilisation du sol, avec une présence de "croûtes étanches" qui induit une augmentation du "rendement des pluies", au niveau hydrologique, c'est à dire que les coefficients d'écoulement augmentent considérablement (Mahé, 2006). Pour une même quantité de pluies, la proportion de la partie qui s'écoule est plus importante qu'auparavant puisque le sol est plus imperméable.

Ces nouvelles conditions de ruissellement apparaissent dans les zones caractérisées par une diminution du couvert végétal, une extension des surfaces cultivées et des surfaces dégradées et concernent apparemment les seuls bassins entièrement compris dans le Sahel.

Une voie vers l'amélioration de l'aptitude à simuler les écoulements aux exutoires des bassins versants est donc de pouvoir prendre en compte dans les modèles la dynamique du milieu (Ruelland *et al.*, *in press*). Cette dynamique résulte soit de changements climatiques, soit de changements anthropiques persistants.

Cette problématique est au cœur du projet RESSAC. Le site d'étude est le bassin versant du Bani, principal affluent du fleuve Niger, situé principalement au Mali (Figure 1).

⁴ Institut de Recherche pour le développement

⁵ Centre National de la Recherche Scientifique

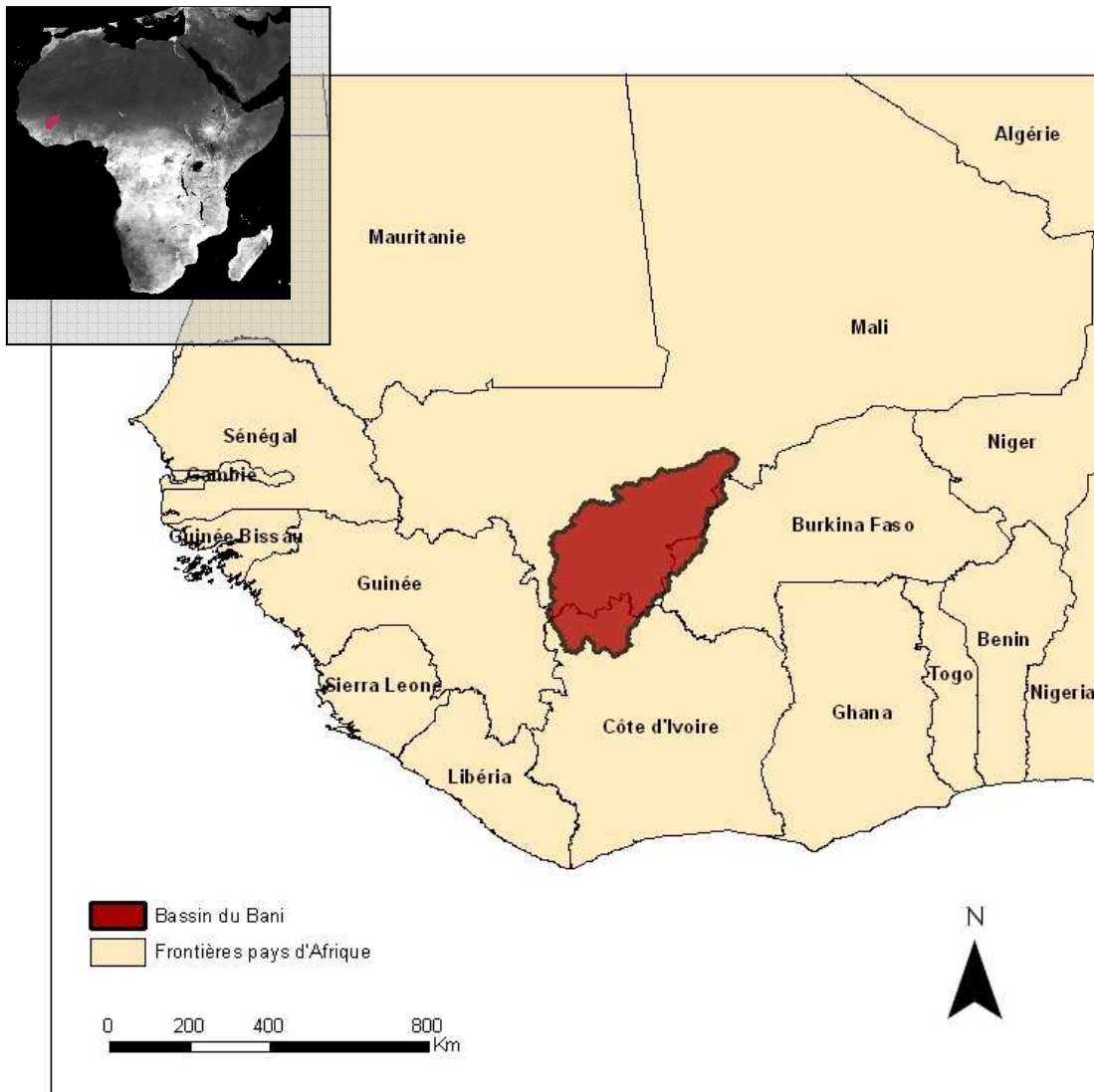


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Bani

L'objectif du projet est tout d'abord de déterminer les effets conjugués des changements climatiques et environnementaux sur les ressources en eau depuis les années 1950 ; dans un second temps, l'objectif est d'élaborer des scénarii climatiques, environnementaux et socio-économiques pour évaluer les impacts possibles sur les ressources en eau à moyen terme (2050).

Le projet s'organise en 9 groupes de travail (GT), répartis en 3 thématiques :

- la thématique 1 rassemble les groupes de travail qui « produisent » des données nécessaires aux traitements ultérieurs
- la thématique 2 regroupe les outils de modélisation et les premiers résultats d'analyse au regard des données antérieures ou actuelles
- la thématique 3 utilise les outils de modélisation validés en thématique 2 avec les données produites élaborées en thématique 1 afin d'étudier la vulnérabilité du Bani à moyen terme.

C'est dans le cadre de la première thématique du projet RESSAC que s'inscrit le sujet de ce stage, et plus précisément dans le GT3. Ce groupe de travail s'intitule « Suivi rétrospectif de l'occupation du sol », il touche donc au domaine de la télédétection.

Pour assurer le suivi diachronique de l'occupation du sol à l'échelle du Bani, ce GT est organisé en deux phases. La première consiste à étudier précisément l'évolution de l'occupation du sol sur 3 sites témoin le long du gradient bioclimatique du bassin sur la période 1950 à aujourd'hui. La deuxième phase, qui est l'objet de ce stage ; consiste à opérer un changement d'échelle, de manière à caractériser cette évolution sur l'ensemble du bassin versant du Bani pour la période de 1980 à aujourd'hui.

La première phase du GT est en cours de finalisation : 3 bassins expérimentaux ont déjà été étudiés. Le bassin de Koumbaka en particulier a été étudié de manière très approfondie. L'étude menée au sein d'HydroSciences de Montpellier (HSM) a permis de mettre en œuvre et de comparer différentes chaînes de traitements diachroniques à partir des données disponibles (Landsat MSS, TM, SPOT 5, Corona et photos aériennes) et de caractériser l'évolution de l'occupation du sol sur 50 ans. La photo-interprétation apparaît comme être la méthode de traitement la plus pertinente pour l'exploitation des connaissances de la zone d'étude, pour le suivi de l'occupation du sol à long terme et à partir de documents multi-sources. (Ruelland *et al*, subm.)

En ce qui concerne l'évolution de l'occupation du sol sur les 3 sites témoin, il en ressort que la proportion des cultures augmente de façon régulière (Figure 2), entre 1980 et aujourd'hui, en cohérence avec la croissance démographique de la population locale. L'autre évolution majeure dégagée par l'étude est le recul des formations végétales naturelles, qui peut s'expliquer par l'extension des zones de cultures, et par la dégradation par le pâturage et la coupe de bois (Levavasseur, 2008 ; Ruelland *et al.*, subm.)

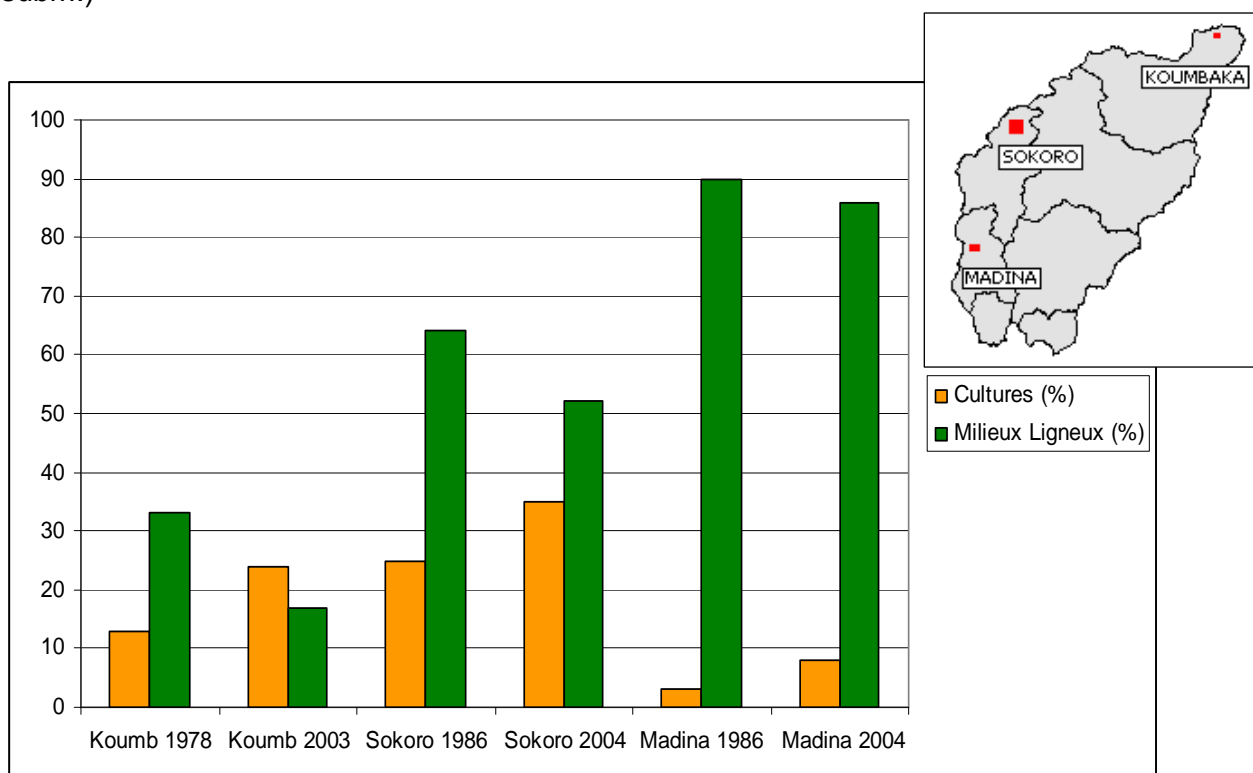


Figure 2 : Evolution des états de surface au sein des 3 bassins expérimentaux : cas des cultures et milieux ligneux. (d'après Levavasseur, rapport de stage 2008 et Ruelland *et al.*, subm.)

La deuxième phase du GT, dans laquelle s'inscrit ce stage ; est l'étude globale du Bani. Il est prévu de la réaliser notamment à partir d'images à basse résolution, seules images permettant une couverture exhaustive du bassin.

A partir de ces images, l'objectif est de développer une méthode pour suivre l'évolution de l'occupation du sol du Bani de 1980 à aujourd'hui.

Nous avons utilisé des images satellitaires à 8 km de résolution, seul jeu de données disponible sur la période et à l'échelle considérées. A cette résolution, il est impossible de cartographier l'occupation du sol de façon précise: il s'agit plutôt de dégager des tendances, d'étudier une variabilité spatiale et temporelle.

Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps aux méthodes existantes pour le suivi de l'occupation du sol à basse résolution.

1.2. Analyse bibliographique

La recherche bibliographique a été ciblée sur des méthodes adaptées au suivi de l'occupation du sol en région aride, et compatibles avec l'utilisation d'images à basse résolution.

Ce sont essentiellement les données des capteurs optiques NOAA-AVHRR à résolution kilométrique qui sont utilisées pour le suivi à long terme. Les régions arides sont un cas particulièrement adapté à la surveillance par télédétection avec cet instrument, du fait de l'utilisation de synthèses temporelles qui permettent de corriger l'enneuagement important de ces zones en saison des pluies.

Synthèses temporelles

Le défi principal du suivi de l'occupation du sol à partir d'images satellitaires en régions équatoriales consiste à disposer d'images dépourvues de nuages. Pour ce faire, on réalise habituellement des synthèses temporelles d'images quotidiennes pour ne retenir que les mesures de luminance utilisables (*Figure 3*).

La méthode de synthèse temporelle la plus souvent utilisée est le Mean Compositing (MC) (Vancutsem *et al.*, 2004). Cette méthode consiste, dans un premier temps, en un contrôle de qualité des observations (élimination des nuages, des voiles atmosphériques et des valeurs erronées) et, dans un second temps, à calculer la moyenne des observations valides pour chaque longueur d'onde acquises pendant la période de synthèse (*Figure 3*). Son avantage est donc de prendre en compte toutes les observations disponibles et utiles pendant une période donnée. De plus, la méthodologie étant très flexible, elle permet d'ajuster la période de synthèse en fonction du couvert nuageux et de la saisonnalité de la région concernée, ce qui s'est révélé particulièrement intéressant pour les zones équatoriales.

Cette méthode a notamment été appliquée avec succès à l'entière du continent européen et à la région des grands lacs et du rift africain afin de produire une carte de l'occupation du sol dans le cadre du projet Global Land Cover 2000 coordonné par le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne (Fritz *et al.*, 2003 ; Mayaux *et al.*, 2004).

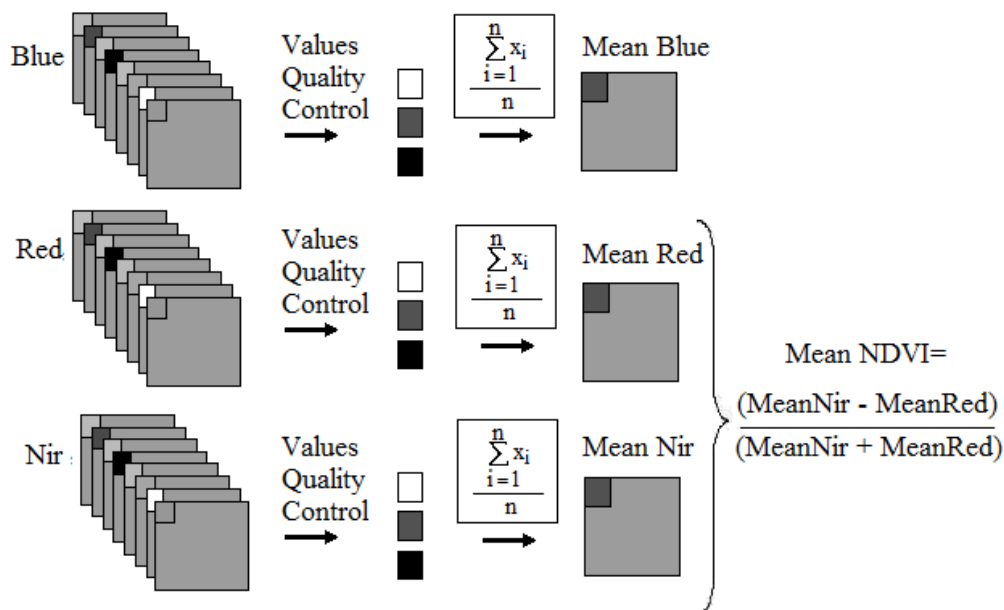


Figure 3 : Schéma de la méthode MC (d'après Vancutsem, 2004)

Classification non supervisée

Une méthode universelle pour le suivi de l'occupation du sol est la classification des synthèses multi-temporelles et l'interprétation des classes. L'approche adaptée à un jeu de données multi-temporelles semble être la détection de changement (Kwaten *et al.* 1998 ; Roberts *et al.*, 1998), résultat de la combinaison de l'information contenue dans les différentes images. Elle consiste à réaliser une seule carte des changements sur la période étudiée.

En ce qui concerne le bassin du Bani, les classifications non supervisées entre 1982 et 2006 ne donnent pas de résultats très probants (Annexe 1). Les changements ne sont pas visibles à cette résolution.

Basse Résolution et indicateur

Les images satellitaires à basse résolution (1km ou plus), comme celles fournies par les capteurs AVHRR de NOAA ou VEGETATION de SPOT, permettent d'effectuer un suivi régulier à très faible coût des ressources renouvelables. La perte de précision due à la faible résolution spatiale est compensée par un large champ d'observation et par une excellente résolution temporelle. Une répétitivité journalière est en effet essentielle pour un suivi régulier des ressources, principalement végétales.

Utilisant des données NOAA-AVHRR, des chercheurs ont récemment détecté une augmentation répandue de la productivité végétale dans le Sahel depuis le début des années 1980 relançant ainsi le débat sur l'inéluctable désertification (Anyamba & Tucker, 2005 ; Eklundh & Olsson, 2003 ; Olsson *et al.*, 2005 ; Tucker & Nicholson, 1999 ; Tucker *et al.*, 1991). Ces études se sont concentrées sur l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) saisonnièrement intégré, une approximation de la Productivité Primaire Nette (NPP).

Initialement défini par Rouse *et al.* (1974) le NDVI a été largement employé ces dernières années dans le cadre du suivi de la végétation à un niveau global, continental ou régional (Townshend, 1994).

Il est calculé comme la différence normalisée des réflectances mesurées dans les canaux proche infrarouge PIR (0.725-1.10 µm) et rouge R (0.58-0.68 µm).

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R})/(\text{PIR}+\text{R})$$

Le NDVI est largement considéré comme un très bon indicateur pour contrôler des changements de végétation saisonniers, surtout dans des régions semi-arides où des relations très fortes avec la productivité primaire nette ont été établies (Holben, 1986 ; Diouf & Lambin, 2001 ; Holm *et al.*, 2003). En effet, de par sa construction (ratio de canaux), le NDVI est peu sensible aux conditions d'illumination et à la pente des surfaces mesurées ; c'est un outil robuste de surveillance de la végétation, dont la valeur, comprise entre -1 et 1, permet un bon seuillage des différentes surfaces continentales :

- Les nuages, l'eau et la neige ont un indice de réflexion plus élevé dans le visible que dans le proche infrarouge, de telle sorte que pour ces surfaces le NDVI est négatif.
- La roche et le sol nu ont des indices de réflexion similaires dans ces deux bandes et produisent un NDVI positif à faible valeur (~0.1).
- En présence de végétation, le NDVI s'étage de 0,1 à 0,6. La différence entre les canaux R et PIR est marquée pour la végétation car les pigments chlorophylliens absorbent fortement l'énergie solaire dans le visible (en particulier dans le rouge), alors que les feuilles se caractérisent par une forte réflectance dans le proche infrarouge due à leur structure interne (Figure 4).

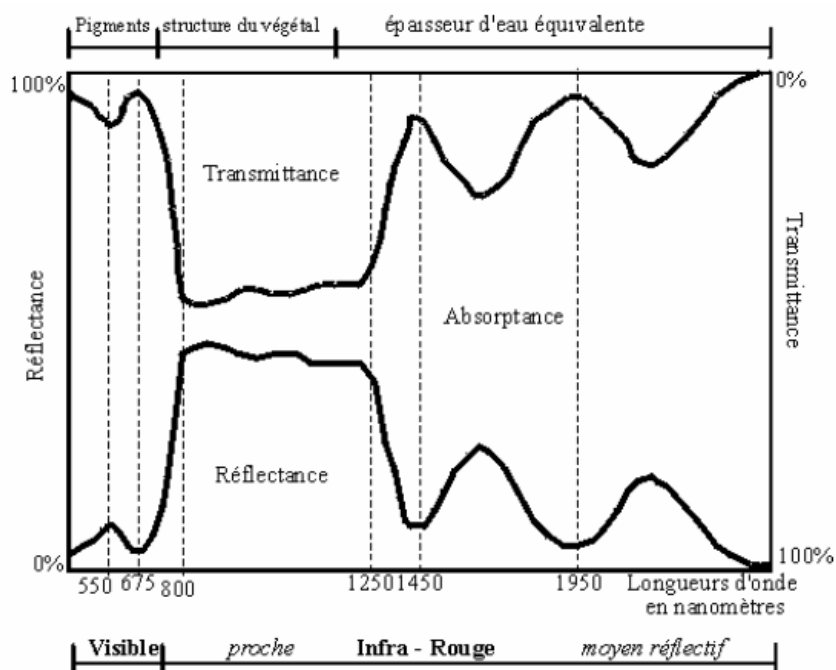


Figure 4 : Spectres de réflectance, d'absorptance et de transmittance pour un végétal chlorophyllien (Girard 1999, d'après Guyot 1997).

Comparaison pluies-NDVI

Le régime de pluies dans la région du Sahel est caractérisé par de grandes variations interannuelles. Depuis le milieu des années 1960, cette région a subi une diminution systématique de la pluviométrie et de grandes sécheresses (Tanaka *et al.*, 1975 ; Bunting *et al.*, 1976 ; Nicholson, 1979 ; Lamb, 1982).

Des études portant sur de grandes zones sahéniennes ont démontré une relation étroite entre la pluie et la productivité de la végétation en utilisant le NDVI saisonnier, à l'échelle de temps interannuelle. (Gray & Tapley, 1985 ; Justice *et al.*, 1985 ; Townshend & Justice, 1986 ; Tucker *et al.*, 1991 ; Tucker & Nicholson, 1999 ; Milich & Weiss, 2000 ; Li *et al.*, 2004).

D'autres travaux récents ont montré que le NDVI était corrélé à la pluie à différents pas de temps, en fonction de différents facteurs environnementaux comme le type de sol (Richard & Pocard, 1998). Malo et Nicholson (1990) ont étudié la relation entre pluies et NDVI au Niger et au Mali et suggèrent que le NDVI mensuel est directement fonction des précipitations mensuelles. La meilleure corrélation est atteinte en utilisant la pluviométrie du mois (ou des deux mois) précédent(s). Dans la même région, Justice *et al.* (1990) ont constaté une forte relation entre les deux paramètres tout en soulignant que le temps de réponse de la végétation aux précipitations est de une à deux décades.

De plus, une autre notion très présente dans la littérature pour cette comparaison pluies/NDVI est le coefficient d'efficacité pluviométrique (CEP). Il a été défini de plusieurs manières.

Tout d'abord, le CEP a été défini en zone aride par Le Houérou (1984) comme le rapport entre la production primaire et la pluviosité annuelle.

Une cartographie de l'évolution du CEP en zone sahénienne a été proposée par Prince *et al.* (1998) en utilisant un estimateur de production végétale annuelle estimable par télédétection. Pour calculer le CEP annuel, il a utilisé la formule suivante :

$$\text{CEP} = (100 * \text{FVV})/P$$

où FVV est la fraction végétation verte exprimée en % (moyenne des 12 valeurs mensuelles) et P est la pluviosité annuelle en mm.

L'efficacité pluviométrique (*RUE pour Rain Use Efficiency*) a également été approximée par Prince *et al.* (1998).

$$\text{RUE} = \text{NDVI}/\text{Pluie} \times 100$$

Cette étude, de même que celle de Lacaze *et al.* (2003) confirment que le CEP peut être considéré comme un indicateur de désertisation. L'étude de Prince *et al.* (1998) a montré une légère augmentation du CEP moyen au Sahel, entre 1982 et 1990, même si certaines régions gardent des valeurs très faibles de CEP. Il a expliqué cette augmentation par deux raisons : une augmentation des pluies après 1984, année de sécheresse, et un changement d'occupation du sol de forêts à cultures.

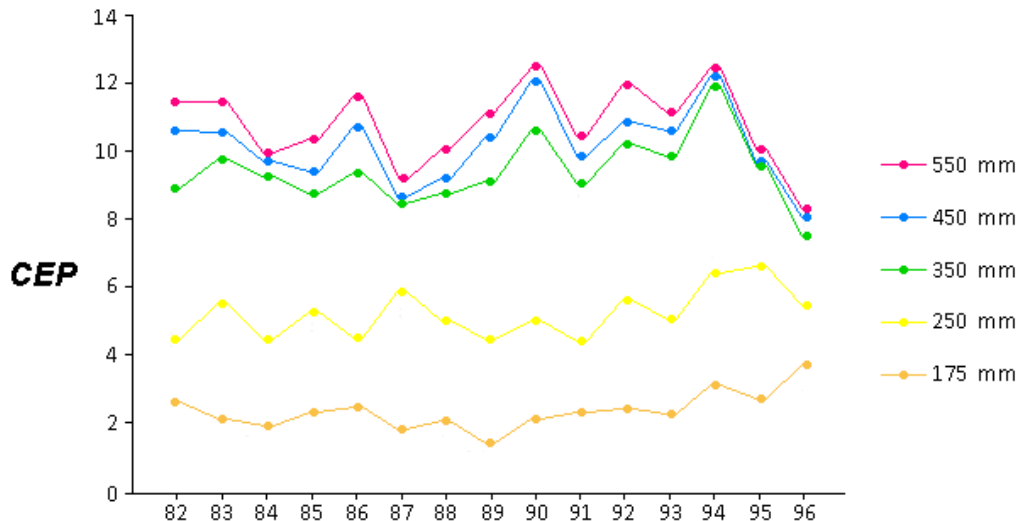


Figure 5 : Valeurs annuelles moyennes du coefficient d'efficacité pluviale sur le bassin méditerranéen de 1982 à 1996, selon des valeurs croissantes de pluviométrie annuelle moyenne (d'après Lacaze, 2003)

1.3. Démarche scientifique pour notre étude

Rappelons que notre objectif est de développer une méthode pour suivre l'évolution de l'occupation du sol du Bani de 1980 à aujourd'hui.

Nous avons utilisé des images satellites à 8 km, résolution pour laquelle il est impossible de cartographier l'occupation du sol. En effet, la valeur numérique d'un pixel « basse résolution » est un mélange de différentes classes d'occupation du sol, dont il est impossible de retrouver les composants de base. Nous avons donc testé une approche originale du problème qui repose sur deux hypothèses :

- il existe une relation unique entre pluviométrie et type de couvert végétal, détectable à travers l'efficacité de la pluie ; ainsi tout changement d'occupation du sol se traduira par une modification de la relation pluie-NDVI ;
- l'occupation du sol peut être décrite par un type de paysage ; tout changement d'occupation du sol peut être détecté par une modification de l'indice de texture des images.

La question centrale est la suivante : l'ampleur des changements d'occupation du sol sur le Bani sera-t-elle détectable par ces méthodes ?

L'étude de l'évolution de la relation pluies-NDVI et l'étude de l'évolution de la texture des images ont donc été menées en parallèle.

Nous avons étudié en détail la zone d'étude et testé différentes approches de segmentation que nous détaillerons plus bas. Nous avons ensuite récupéré, puis traité les différents jeux de données nécessaires à notre étude. Nous avons enfin extrait les indices de végétation et de texture de nos images, et les avons mis en relation avec les données de pluies. Les différentes étapes sont résumées en Figure 6 et Figure 7. La Figure 6 présente les différentes étapes suivies pour la première approche, via l'étude d'images NOAA et d'indices de végétation, alors que la Figure 7 résume les étapes de l'étude d'images MODIS et des indices de texture.

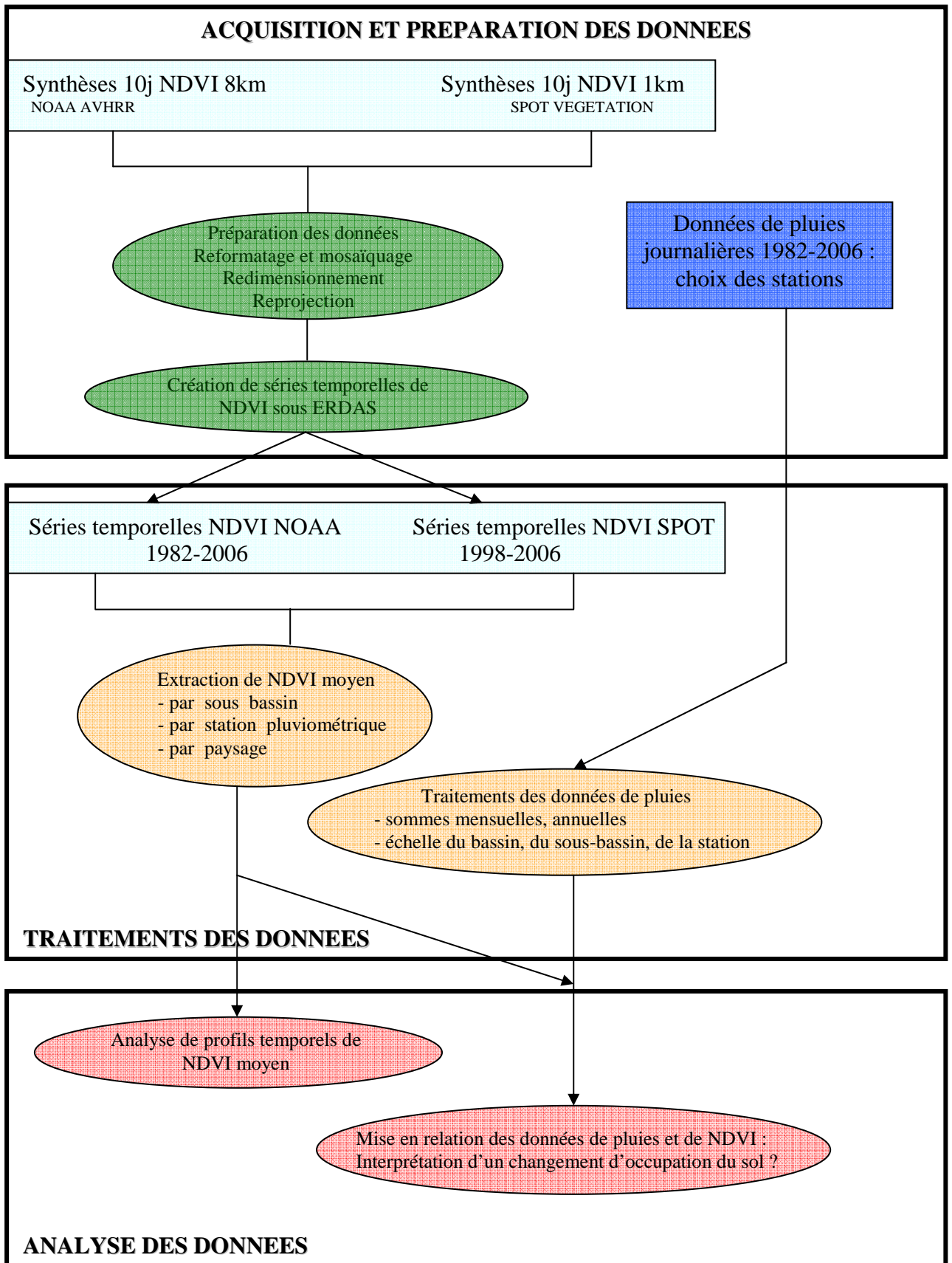


Figure 6 : Démarche et méthodologie pour l'approche 1 : images NOAA-AVHRR (et SPOT4-VEGETATION) et indice de végétation.

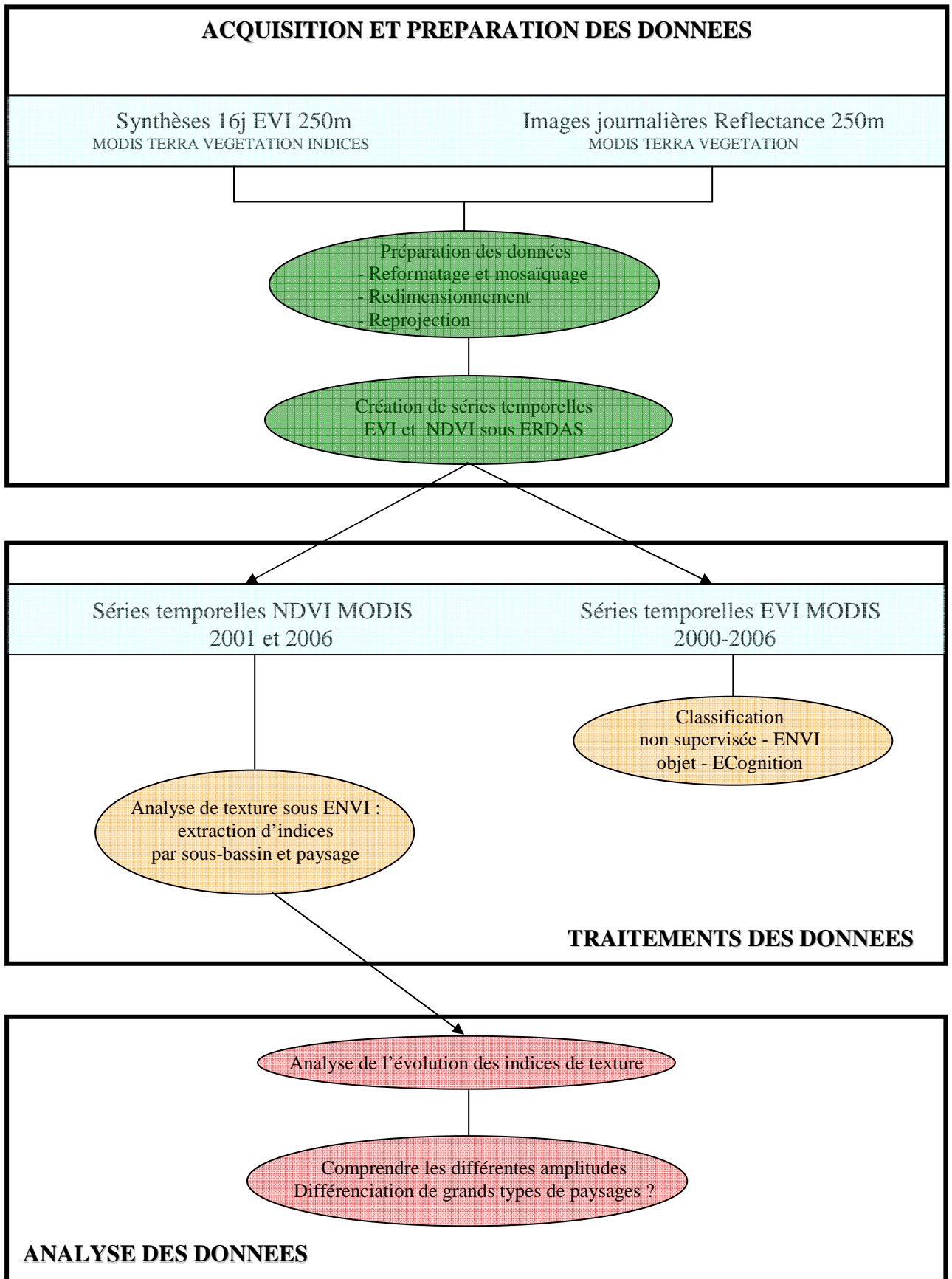


Figure 7 : Démarche et méthodologie pour l'approche 2 : images MODIS et indices de texture.

Partie 2 : Acquisition et pré-traitements des données

2.1. Zone d'étude

2.1.1. Présentation

Situé pour 85 % dans le Sud du Mali (Figure 1), le bassin versant du Bani à Sofara est le principal affluent du fleuve Niger au Mali. Les 15% restants sont situés au Burkina Faso, en Côte d'Ivoire et une toute petite partie en Guinée. Le bassin occupe une superficie d'environ 130 000 km².

Climat et géographie

Le Bani appartient au domaine climatique soudano-sahélien de type semi-aride tropical marqué par l'alternance de deux saisons principales contrastées : une saison sèche (de novembre à avril) et une saison pluvieuse, de mai à octobre, dominée par le flux de la mousson.

La pluviométrie sur le bassin du Bani varie fortement suivant un gradient climatique nord / sud ; elle passe de moins de 600 mm au nord à plus de 1500 mm au sud. De 1980 à aujourd'hui, les pluies sur le Bani apparaissent relativement irrégulières d'une année à une autre. Il y a cependant certaines années de sécheresse très marquées, comme 1984 et 2002. Les données de pluies seront présentées de manière plus approfondie dans la Partie 2.3.

D'autre part, le relief est limité sur cette zone, avec une altitude comprise entre 0 et 700 mètres environ, d'après le MNT SRTM 90m.

Les paysages sont en constante évolution, la cartographie fournie par Global Land Cover en 2000, permet toutefois de segmenter le Bani en 5 grands types de paysages, comme le montre la Figure 8.

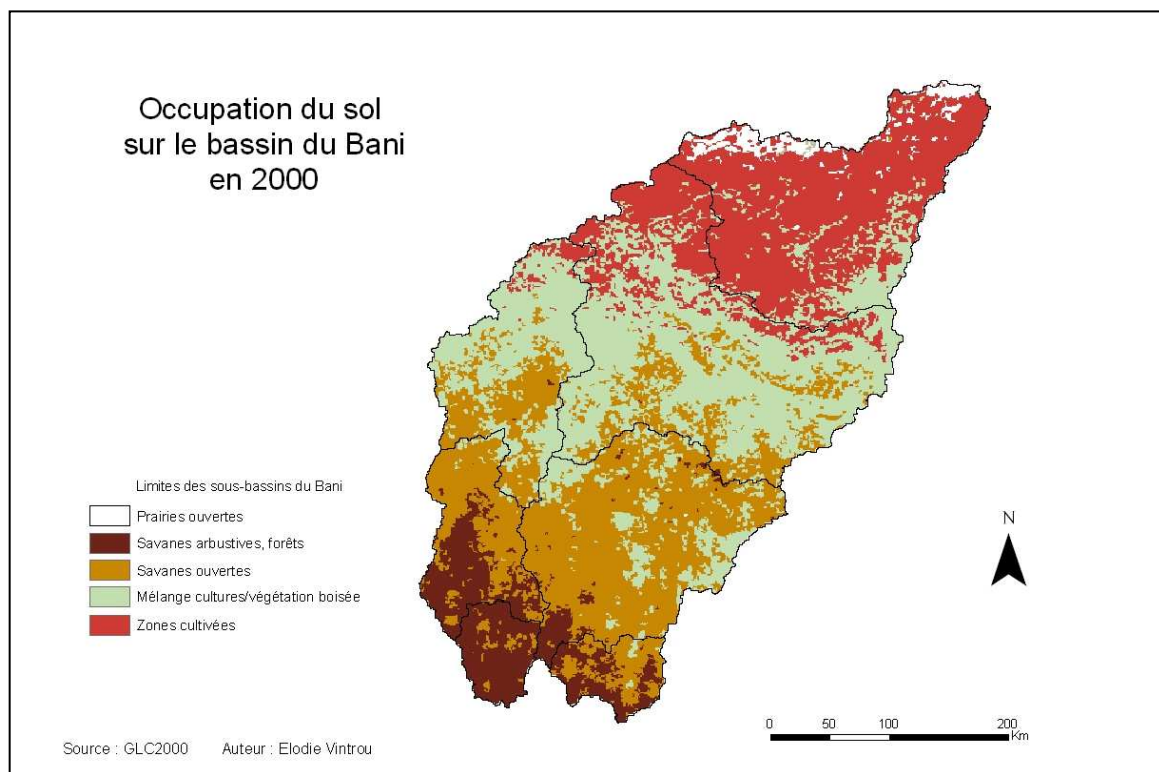


Figure 8 : Carte d'occupation du sol du Bani en 2000 (source : GLC 2000)

Population et activités

Au Mali, la population connaît une croissance démographique forte de 2,8% par an (USAID, 1997). Cette population est essentiellement rurale. L'économie malienne est principalement agricole mais les récoltes dépendent presque totalement des aléas climatiques et surtout des inondations du Niger et de ses affluents. 72% de la population active travaille dans ce secteur qui représente 43% du PNB. Mais la production agricole est faible, souffrant à la fois d'un manque d'infrastructure en milieu rural, et de rendements faibles très dépendants des variations climatiques.

La population humaine locale exerce une pression importante sur le bassin versant du Bani. Les surfaces cultivées ont augmentées (coton et céréales), tandis que les forêts et les prairies se sont détériorées (Ruelland *et al.*, soumis ; Levavasseur, rapport de stage, 2008). C'est aussi une grande zone de pâturage pour le bétail.

2.1.2. Segmentation de la zone

Le bassin du Bani mesure 130 000 km². Afin de ne pas moyenniser les effets de changements d'occupation du sol qui sont a priori hétérogènes au sein du bassin, il est apparu indispensable de segmenter l'espace en zones homogènes, en terme de paysages ruraux ou de fonctionnement hydrologique. Différents critères ont été testés pour la segmentation, et nous avons retenu 2 types de découpages pour notre étude.

La première segmentation proposée a été une segmentation **par sous-bassin versant** (Figure 9).

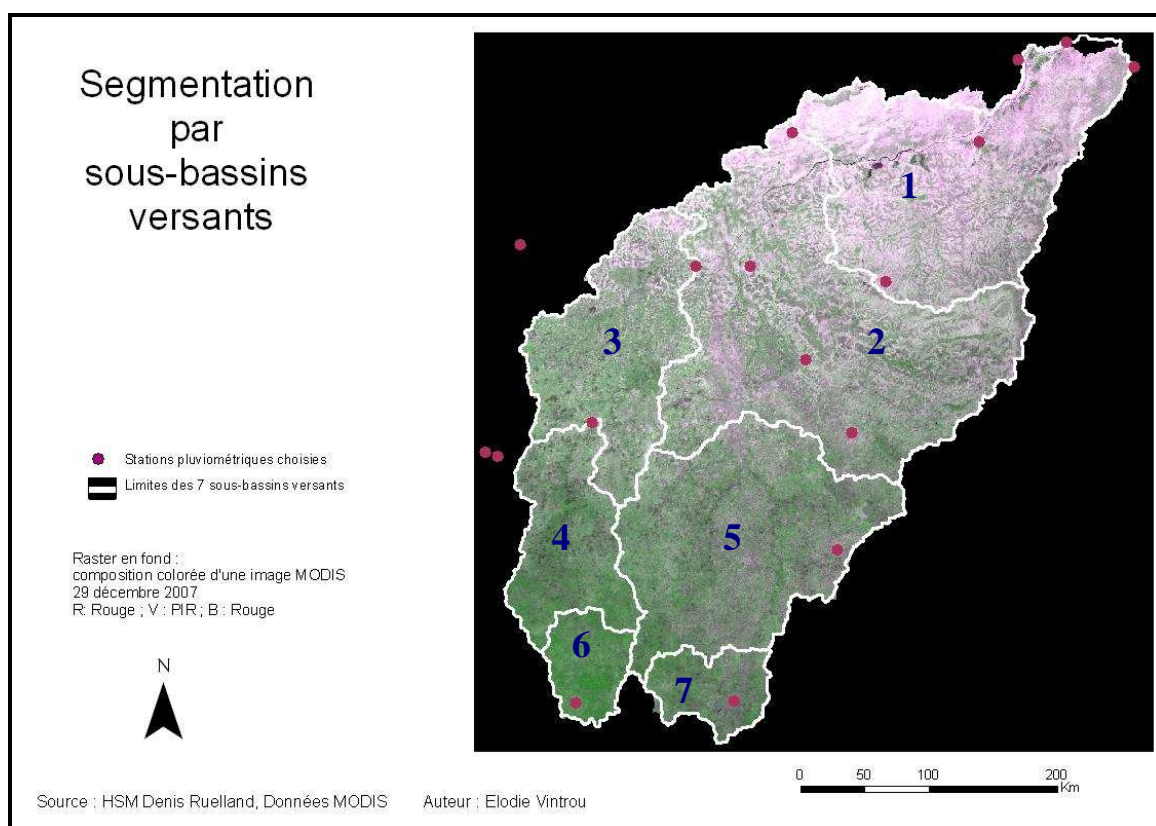


Figure 9 : Segmentation du Bani en sept sous-bassins versants, sur fond de composition colorée de l'image MODIS-TERRA du 29 décembre 2007

La deuxième segmentation **par paysage** a été obtenue après confrontation de différences sources (Figure 10). Tout d'abord, différentes classifications sous ENVI (Annexe 1) ont permis de mieux appréhender les différents groupes de paysages composant le bassin. Parce que le type de végétation dépend de la pluviométrie, ces paysages suivent globalement les isohyètes. Il a donc été décidé de dégager 3 paysages bien distincts, à l'aide de la cartographie proposée par le GLC 2000 et des classifications, que nous avons déjà évoquées dans la partie précédente, mais également de la connaissance du terrain (Figure 11 et Figure 12).

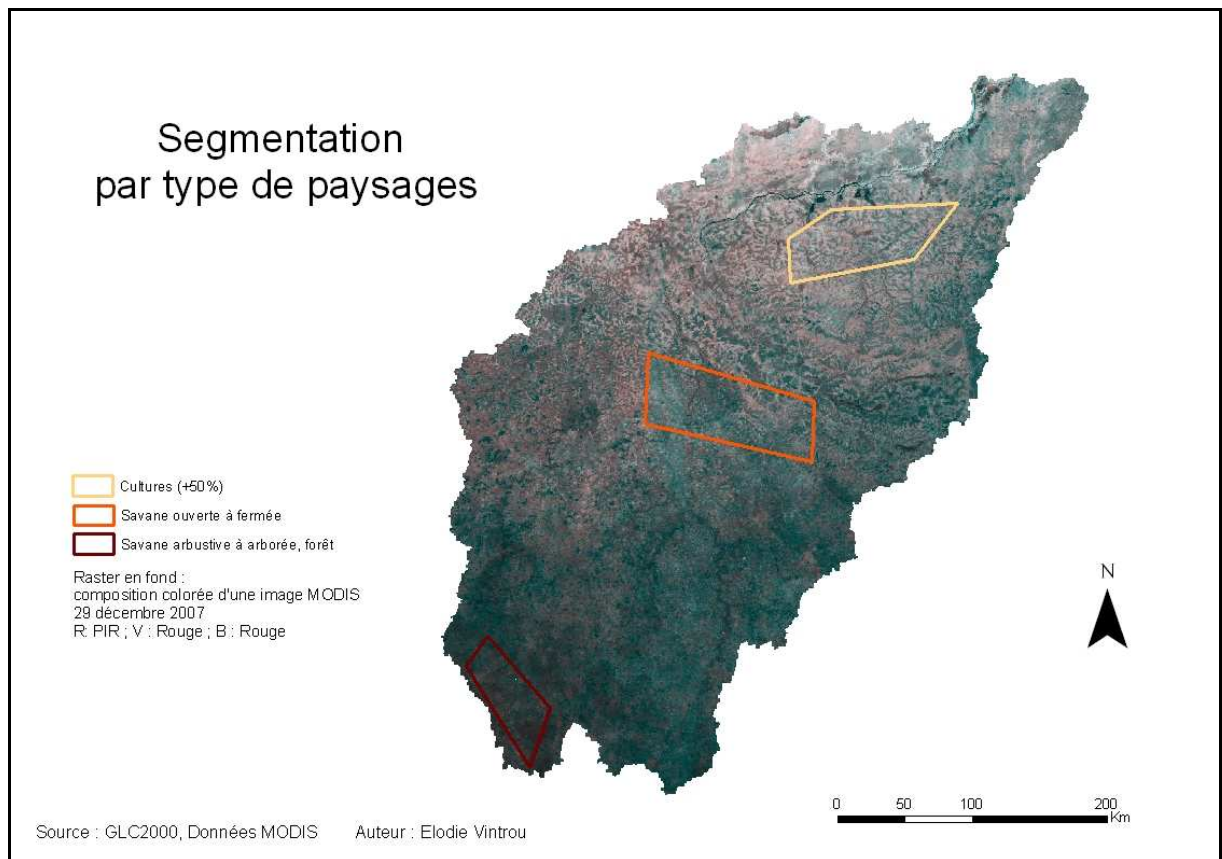


Figure 10 : Délimitation de trois paysages du Bani, sur fond de composition colorée de l'image MODIS-TERRA du 29 décembre 2007.



Forêt



Savane arbustive fermée



Savane ouverte

Figure 11 : Photographies des milieux rencontrés sur le site soudanien de Madina Diassa (Fév 2008, D. Ruelland)



Savane arbustive



Cultures (mil récolté)

Figure 12 : Photographies des milieux rencontrés sur le site sahélien de Koumbaka (Nov 2006, D. Ruelland)

2.2. Acquisition et préparation des images

Pour étudier l'occupation du sol à l'échelle du Bani, nous avons choisi les images satellites en fonction de plusieurs critères pratiques, tel que le coût mais également en fonction de leurs potentialités pour l'étude de l'occupation du sol.

Il existe plusieurs capteurs large champ produisant des images adaptées à l'observation des surfaces terrestres, comme par exemple NOAA-AVHRR (1982-2006), SPOT-VEGETATION (1998-2008), et TERRA-MODIS (2000-2006).

Les images NOAA ont été retenues pour l'analyse de l'évolution du NDVI, seul jeu de données gratuit, disponible sur les 25 années considérées (1982-2006). Ces données globales ont démontré leur intérêt dans le cadre du suivi de la végétation (Tucker *et al.*, 1985 ; Justice *et al.*, 1985 ; Townshend & Justice, 1986 ; Lloyd, 1989 ; Los *et al.*, 1998 ; Los *et al.*, 2000).

On utilise également des images SPOT VEGETATION pour étudier sur une courte période (1998-2008) l'effet de la résolution sur les tendances observées.

En ce qui concerne l'analyse texturale, notre choix s'est rapidement porté sur les images issues du capteur MODIS-TERRA, dont les caractéristiques techniques sont très intéressantes : en effet, MODIS-TERRA acquiert des images dans le visible et le proche infrarouge à une résolution spatiale de 250 m, contre 1 km pour les autres satellites, en gardant une résolution temporelle journalière. De plus, ce capteur propose comme produits les indices de végétation NDVI et EVI.

2.2.1. Généralités

Les satellites de télédétection à large champ qui observent la Terre sont nombreux. Leurs missions sont principalement orientées dans un but scientifique (température de la mer, manteau neigeux, sécheresse, etc), économique (ressources naturelles, agriculture, etc.) ou militaire. Les caractéristiques des 3 types d'images retenues pour notre étude, NOAA-AVHRR, SPOT VEGETATION et MODIS TERRA, sont résumées ci-après.

➤ **Satellite:** NOAA-AVHRR

Opérateur: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

Date de lancement: 1970 (NOAA1), 05/1998 (NOAA 15), 09/2000 (NOAA 16), 06/2002 (NOAA 17), 05/2005 (NOAA 18)

Type d'orbite: hélio-synchrone

Altitude: 850 km

Inclinaison de l'orbite: 98° par rapport au plan équatorial

Période de révolution: environ 102 minutes, si bien qu'il survole l'équateur au moins 14 fois par jour, en passages ascendant et descendant.

➤ **Instrument:** AVHRR

L'AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) est un radiomètre qui balaye une fauchée d'environ 3000 km de large. La résolution est de 1,1 à 4 km (1,1 km à la verticale du satellite).

Bandes spectrales : B , V , R, PIR, MIR

➤ **Satellite: SPOT-VEGETATION**

Opérateur: Satellite pour l'observation de la Terre (SPOT)

Date de lancement: 02/86 (SPOT1), 01/1990 (SPOT2), 09/1993 (SPOT3), 03/1998 (SPOT4), 05/2002 (SPOT5)

Type d'orbite: hélio-synchrone.

Altitude: 820 km

Inclinaison de l'orbite: 98,7° par rapport au plan équatorial

Période de révolution: environ 101 minutes.

➤ **L'instrumentation embarquée**

Elle a évolué au fil des satellites. Depuis SPOT4, le capteur VEGETATION a une fauchée de 2 250 km et offre une résolution constante de 1 150 m.

Bandes spectrales : B, R, PIR, MIR

➤ **Satellite: MODIS-TERRA**

Programme : EOS (Earth Observation System)

Date de lancement: 1999 (TERRA), 2002 (AQUA)

Type d'orbite: hélio-synchrone polaire

Altitude: 705 km

Inclinaison de l'orbite: 98,2° par rapport au plan équatorial

Période de révolution: 1 à 2 jours

➤ **L'instrumentation embarquée**

Parmi les nombreux instruments embarqués, le capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) capte des données dans 36 bandes spectrales de 0,4 à 14,4 µm. Pour les images journalières, la résolution est de 250m et les bandes spectrales sont le PIR et le R.

2.2.2. Produits sélectionnés

✓ **NOAA-AVHRR**

L'imagerie NOAA AVHRR possède deux jeux de données principaux : un jeu à 1 km et un autre à 4 km, traité pour fournir des produits composites, comme par exemple des synthèses NDVI de 10 jours.

Les synthèses NOAA/AVHRR sont des « Maximum Value Composite » (Holben, 1986) effectués sur 10 jours après filtrage des nuages grâce aux canaux thermiques. Chaque pixel de la synthèse correspond à la plus forte valeur de NDVI enregistrée pour le même pixel au cours des 10 jours. Les synthèses sont donc, au final, des "mosaïques temporelles" où la radiométrie d'un pixel et de son voisin peuvent avoir été acquises à des dates différentes.

✓ **SPOT-VEGETATION**

Les données acquises par le capteur VEGETATION subissent des pré-traitements géométriques et radiométriques avant d'être distribuées sous différents produits. Nous avons choisi le produit VGT-S10 (S = synthesis): ce sont des synthèses temporelles de 10 jours constituées avec la méthode MVC (Maximum Value Composite), tout comme pour les synthèses NOAA NDVI.

✓ **MODIS-TERRA**

Nous avons choisi deux types de produits :

- des synthèses EVI (Enhanced Vegetation Index) de 16 jours à 250m, de l'année 2000 à 2006. Cet indice est calculé à partir du produit de réflectance terrestre de

base (MODIS Terra surface réflectance) qui a été corrigé des effets atmosphériques (dispersion moléculaire, absorption de l'ozone et des aérosols).

- des images journalières de réflectance terrestre à 250m de résolution. Une centaine d'images ont été choisies pour les années 2001 et 2006. Pour chacune des images, nous avons calculé le NDVI sous Erdas, grâce à l'opération suivante :

$$\text{NDVI} = (b3-b2)/(b3+b2)$$

où b3 est la réflectance dans le canal Proche Infrarouge et b2 est la réflectance dans le canal Rouge.

2.2.3. Acquisition et pré-traitements

✓ NOAA-AVHRR

Les données composites ont été fournies par le groupe Global Inventory Monitoring and Modelling Studies (GIMMS) de la National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center (NASA/GSFC). Concrètement, elles sont récupérables sur le serveur FTP du GIMMS (pengimms.gsfc.nasa.gov)

Elles ont été obtenues à partir des données collectées quotidiennement par les capteurs AVHRR des satellites NOAA-7, 9, 14, 16 et 17. Les données sont collectées à la résolution spatiale de 1.1 km au nadir. Les données pleine résolution enregistrées à bord correspondent au format LAC (Local Area Coverage). Les données GAC (Global Average Coverage) sont dérivées des données LAC et échantillonnées à bord à la résolution spatiale de 4 km. Les données GAC sont ensuite re-échantillonnées à la résolution de 8 km. Elles sont générées en sélectionnant la valeur maximale du NDVI pour minimiser la contamination des pixels par les nuages (Kaufman, 1987) et les interférences atmosphériques (Holben, 1986).

La série de données fournie par le GIMMS prend en compte les améliorations de la navigation (Rosborough *et al.*, 1994) et de la calibration des canaux visible proche infra-rouge (Vermote and Kaufman, 1995), optimisées par la méthode de correction de la dégradation des capteurs établie par Los (1998). La série de données est également corrigée des interférences atmosphériques dues aux éruptions volcaniques de 1982 et 1991 (Vermote *et al.*, 1997). Les deux périodes corrigées sont comprises entre avril 1982 - décembre 1984 et juin 1991 - décembre 1993.

Nadine Dessay, ingénieur d'étude à l'IRD de Montpellier, avait déjà récupéré et traité ces données à l'échelle de l'Afrique. Un filtre de valeurs irréalistes a été appliqué sur la série de données GIMMS (Dessay, 2004). En effet, le NDVI peut varier entre -1 et 1. Toutes les valeurs supérieures ou inférieures à ses bornes ont été masquées.

J'ai donc profité de son travail, et pu accéder à des données propres concernant ma zone d'étude.

Les données composites fournies par le GIMMS sont en projection Goode Homolosine (ou projection interrompue de Goode), développée par Goode en 1923. C'est une projection pseudocylindrique équivalente que l'on privilégie lorsque que l'on veut respecter les surfaces. Elle mêle la projection de Mollweide (ou Homolographique) pour les hautes latitudes, et une projection sinusoïdale pour les basses latitudes. Ces deux projections transforment les parallèles en droites horizontales régulièrement espacées que les méridiens coupent à intervalles égaux, le méridien de référence déterminant les origines sur ceux-ci. Elles sont équatoriales et ne prennent donc pas en

compte les régions polaires. En combinant la projection sinusoïdale, qui est conforme le long de l'équateur d'une part, et du méridien de référence d'autre part, et la projection de Mollweide, qui est plus régulière dans les latitudes plus hautes, les déformations sont limitées.

✓ SPOT

Les images ont été téléchargées sur le site <http://free.vgt.vito.be/home.php>, sous forme de synthèse 10 jours, de 1998 à 2006. Nous avons choisi la plaque correspondant au continent africain, et les synthèses NDVI.

Les images sont corrigées des effets atmosphériques et le compte numérique de chaque pixel représente donc en théorie la réflectance au sol.

Ces fichiers sont récupérables au format HDF. Elles sont délivrées dans un système de coordonnées géographiques.

✓ MODIS

Sur le site <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>, il est possible de télécharger des images MODIS journalières ainsi que des synthèses EVI de 16 jours.

De même que pour les produits SPOT sélectionnés, les images MODIS sont corrigées des effets atmosphériques et le compte numérique de chaque pixel représente donc en théorie la réflectance au sol. Pour chaque image journalière, en plus des deux bandes spectrales (PIR et R), il existe une bande « qualité », codées en 16 bit.

Ces fichiers sont récupérables au format HDF.

Les données sont fournies en projection sinusoïdale. C'est une projection pseudocylindrique, pour laquelle les parallèles sont des droites régulièrement espacées. Mais ici, les méridiens ont une forme sinusoïdale. Seul le méridien central est rectiligne.

Extraction, compilation et reprojection

Les 3 jeux de données ont tout d'abord été compilés en séries temporelles, grâce à l'outil "Layer Stack" du logiciel ERDAS.

- En ce qui concerne les images NOAA, nous avons créé 3 fichiers :
 - o un fichier de 612 canaux bruts des synthèses NDVI 15 jours de 1982 à 2006 ;
 - o un fichier « mensuel » de 300 canaux, avec des synthèses mensuelles de NDVI de 1982 à 2006. Les NDVI sont moyennés sur un mois ;
 - o un fichier « annuel » de 25 canaux, avec des synthèses annuelles de NDVI. Les valeurs des pixels sont des moyennes de NDVI sur un an, de 1982 à 2006.
- Les images SPOT ont été compilées en une série temporelle de NDVI, image à 306 couches, qui sont des synthèses NDVI 10 jours de 1998 à 2006
- Enfin, nous avons créé 2 fichiers à partir des images MODIS téléchargées : une série temporelle EVI, et une série temporelle NDVI (21 synthèses pour l'EVI sur l'année 2002, et 10 dates en 2001 et en 2006 pour la série NDVI).

Toutes les séries temporelles ont ensuite été découpées pour récupérer seulement la zone d'intérêt, l'extraction des images SPOT ayant été faite au préalable grâce au VGT Extract, module proposé par le site de Vito.

Les fichiers ont finalement été projetés en UTM WGS 84 zone 30.

Tableau 1 : Sites et paramètres de téléchargement

	Synthèse temporelle	Résolution spatiale	Téléchargement	Format de téléchargement	Projection de téléchargement	Canaux téléchargés						Périodes téléchargées	Outils d'extraction et reformatage	Format après conversion	Projection après conversion	Autres	
						B	V	R	PIR	MIR	NDVI						EVI
NOAA-AVHRR Synthèse NDVI 8km	10j	8 km	ftp://pengimms.gsfc.nasa.gov	Raw	Goode Homolosine						x		1982- 2006	Batch Import Erdas	IMG	UTM WGS84 Zone 30	- Conversion des coordonnées du coin supérieur gauche -Assemblage des couches par le layerstack d'ERDAS sous forme de batch
SPOT VEGETATION Synthèse NDVI	10j	1 km	http://free.vgt.vito.be/	HDF-EOS	Geog Lat Long						x		1998- 2006	VGT Extract	IMG	UTM WGS84 Zone 30	
MODIS Synthèse indice de végétation	16j	250 m	http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/	HDF-EOS	Sinusoïdale	x		x	x	x	x	x	2000- 2006	Aucun (lues sous Erdas)	IMG (par mosaïque)	UTM WGS84 Zone 30	- Mosaiquage des plaques deux par deux sous Erdas avec un découpage du Bani - Assemblage de la série temporelle sous Erdas (layerstacking)
MODIS Daily Reflectance	1j	250 m	http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/	HDF-EOS	Sinusoïdale			x	x				20 images en 2001 et 2006				

2.3. Les données de pluies

Les données de précipitations sur le bassin du Bani ont été fournies par Jean-Emmanuel Paturel, chargé de recherche à l'IRD. Les données provenant de différentes chroniques et de différentes stations ont été mises en forme pour constituer des séries journalières de pluies en une seule chronique, de 1950 à 2006, sur 65 stations de la région du Bani.

Pour la comparaison NDVI-pluies, il a d'abord été nécessaire de retenir quelques stations par sous-bassin. Ces stations ont été retenues suivant deux critères principaux : l'absence (ou le faible nombre) de lacunes et la situation géographique. Ainsi, les stations retenues pour les différents sous-bassins sont présentées dans le Tableau 2.

Sous bassin	Noms des stations
1	Ségou, Koutiala, San, Djenné, Sofara, Ségué
2	Sikasso, Kignan, Dioila, Beleko
3	Bamako, Bougouni, Dioila
4	Bougouni, Yanfolila, Goualala
5	Kadiolo
6	Odienne
7	Boundiali

Tableau 2 : Choix des stations par sous-bassin

Le schéma ci-dessous (Figure 13) illustre les 65 stations retenues par l'ANR RESSAC (en jaune) et les stations retenues pour cette étude (en rouge).

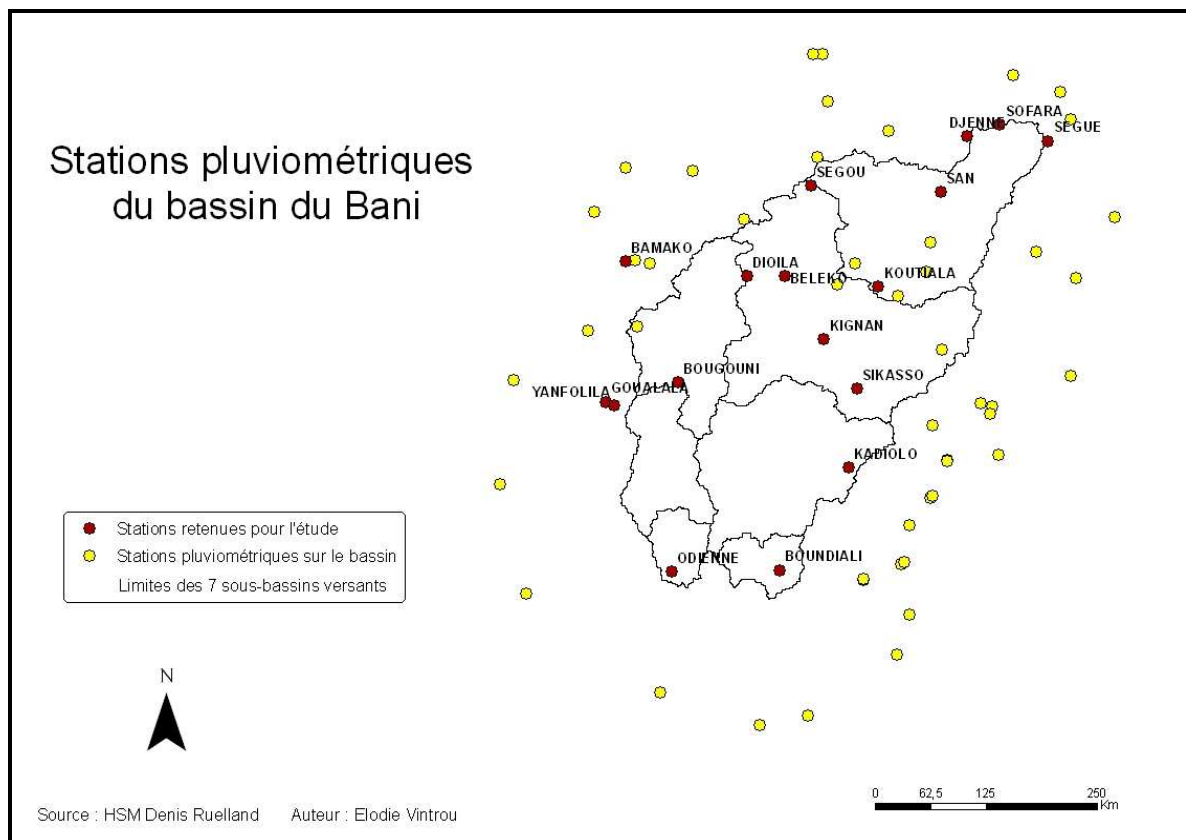


Figure 13 : Stations pluviométriques du bassin du Bani

Partie 3 : Traitements des données

Cette partie a été mise en œuvre dans le but d'assurer un suivi de l'occupation du sol sur le bassin du Bani de 1982 à 2006. Pour cela, rappelons que nous avons dégagé deux objectifs. Le premier consiste à vérifier qu'il existe une relation unique entre pluviométrie et type de couvert végétal, pour pouvoir détecter un changement d'occupation du sol, qui se traduira par une modification de la relation pluie-NDVI. Le deuxième objectif repose sur l'évaluation de l'évolution de l'indice de texture des images, qui pourrait révéler un changement d'occupation du sol.

Dans les deux cas, le but est de s'affranchir de l'effet « pluies » pour comparer les années, et voir l'évolution du NDVI et de la texture aux cours du temps. Les variations seront alors dues uniquement aux activités humaines et ainsi aux changements d'occupation du sol.

3.1. Extraction du NDVI

Grâce à l'outil « Zonal Attributes » d'Erdas, le NDVI moyen peut être extrait suivant différents types de segments (sous-bassin, isohyète, paysage...). Le raster utilisé est celui, successivement, des synthèses NOAA compilées par mois et par année, puis des synthèses SPOT. On extrait donc les attributs des différents polygones.

En ce qui concerne l'évolution de la moyenne de NDVI au cours des 25 années, en conservant les données mensuelles, il a été nécessaire de construire un batch permettant d'extraire les valeurs de maximum pour les 300 couches de l'image. La construction du batch est donnée en Annexe 2.

Les graphiques générés par ce calcul d'attributs sont présentés dans la partie 4.

3.2. Calcul du Coefficient d'Efficacité Pluviométrique (CEP)

Pour chaque station, les données de pluies de 1982 à 2006 ont été moyennées par mois et par an sous Excel.

Par ailleurs, ces données de pluies doivent être confrontées aux indices de végétation extraits sur les images. Nous avons tout d'abord travaillé avec un décalage d'un mois, pour relier la valeur du NDVI à celle de la pluie du mois précédent. Nous avons travaillé sur les mois de mars à novembre, pour ne pas obtenir de valeurs aberrantes lors de très faibles pluies mensuelles.

Nous avons également utilisé une notion courante dans ce type d'étude, l'efficacité pluviométrique, qui a été expliquée dans la partie 1. Nous avons utilisé la définition simplifiée de Prince *et al.* (1998), qui consiste à faire un rapport du NDVI par la pluviométrie annuelle. Nous avons également appliqué cette formule au pas de temps mensuel, en ne conservant que les pluies supérieures à 20mm, pour ne pas obtenir des valeurs d'efficacité aberrantes.

$$\frac{\sum_1^m NDVI}{\sum_1^m (P \geq 20mm)}$$

où m est le mois de l'année, et P les précipitations mensuelles en mm.

Il existe également une autre méthode (Hountondji *et al.*, 2006), qui consiste à utiliser le NDVI maximum par année, et les pluies importantes uniquement. Nous testerons également cette deuxième méthode.

Le CEP évolue au cours du temps, en fonction de la pluie et des activités humaines. Nous avons essayé de nous affranchir de la pluie via une méthode de correction du CEP. Tout d'abord, nous avons calculé le CEP par paysage, en fonction de la pluie. Cette fonction nous servira de modèle pour ensuite pouvoir corriger l'évolution du CEP au cours des 25 dernières années, et pouvoir suivre les changements d'amplitude de l'efficacité pluviométrique qui dépendront alors uniquement de l'occupation du sol.

Nous avons donc calculé, pour un paysage donné :

$$\text{Efficacité corrigée (pluies } i) = \frac{\text{Efficacité mesurée (pluies } i) \times \text{Efficacité (pluies ref)}}{\text{Efficacité modèle (pluies } i)}$$

La pluie de référence est de 600 mm pour le paysage 1, 900 mm pour le paysage 2 et de 1300 mm pour le paysage 3.

3.3. Analyses de texture MODIS

3.3.1. Bases théoriques

La texture est comparée à la perception d'un arrangement local plus ou moins régulier qui donne à la zone considérée une apparence d'homogénéité dans l'image. Elle fournit des informations dans l'arrangement spatial des intensités dans une image en fonction du voisinage. Haralick *et al.* (1973) l'a décrit de la façon suivante : « L'environnement spatial peut être interprété comme une distribution spatiale d'objets de diverses surfaces ayant une taille et des qualités d'émission et de réflectance caractéristiques. L'organisation spatiale et les relations entre objets apparaissent alors comme une distribution spatiale de tons de gris, les structures de distribution spatiale de tons de gris sont appelées « texture ».

D'après différentes publications (Borne, 1994 ; Hauta-Kasari *et al.*, 1999 ; Lelong and Thong-Chane, 2003 ; Hu, 2005), l'analyse de texture n'a été appliquée jusqu'à présent qu'avec des images de très haute résolution spatiale, pour pouvoir définir des "primitives" qui se répètent dans les textures. En général les textures étudiées ont une "orientation" et le plus souvent, sont linéaires. Le Bani ne se situe pas dans ce contexte, mais rappelons l'hypothèse de notre démarche : tout changement d'occupation du sol peut être détecté par une modification de l'indice de texture des images. Il reste donc à analyser l'évolution de l'indice de texture au cours d'une année, de comparer cette évolution au sein de différents paysages pour pouvoir comprendre les variations, et voir s'il est possible de conclure à un changement d'occupation du sol.

Nombreuses sont les méthodes et techniques proposées dans la littérature pour mesurer la texture comme la cooccurrence (avec une étude comparative des indices définis par Haralick) et l'analyse fréquentielle (Fourier). La méthode de Haralick *et al.*

(1973) est la plus répandue, elle permet d'extraire la majorité des informations de texture. La procédure utilisée par Haralick *et al.* (1973) pour obtenir l'information texturale d'une image est basée sur l'hypothèse suivante : "l'information de texture dans une image est contenue dans les relations spatiales entre les niveaux de gris". Ces relations sont alors représentées numériquement à l'aide des matrices de dépendance spatiale de niveaux de gris, également appelées matrices de cooccurrence (Figure 14). Ces matrices contiennent une masse très importante d'informations difficilement manipulable. Ainsi, elles ne sont pas utilisées directement mais à travers des mesures dites indices de texture. Haralick *et al.* (1973) ont proposé quatorze indices. Bien que corrélés entre eux, ces indices réduisent l'information contenue dans la matrice de cooccurrence et permettent une meilleure discrimination entre les différents types de textures. La réussite de la méthode dépend de deux paramètres : le choix de la fenêtre de voisinage et du vecteur de déplacement. Ces deux paramètres dépendent justement des images et des textures étudiées.

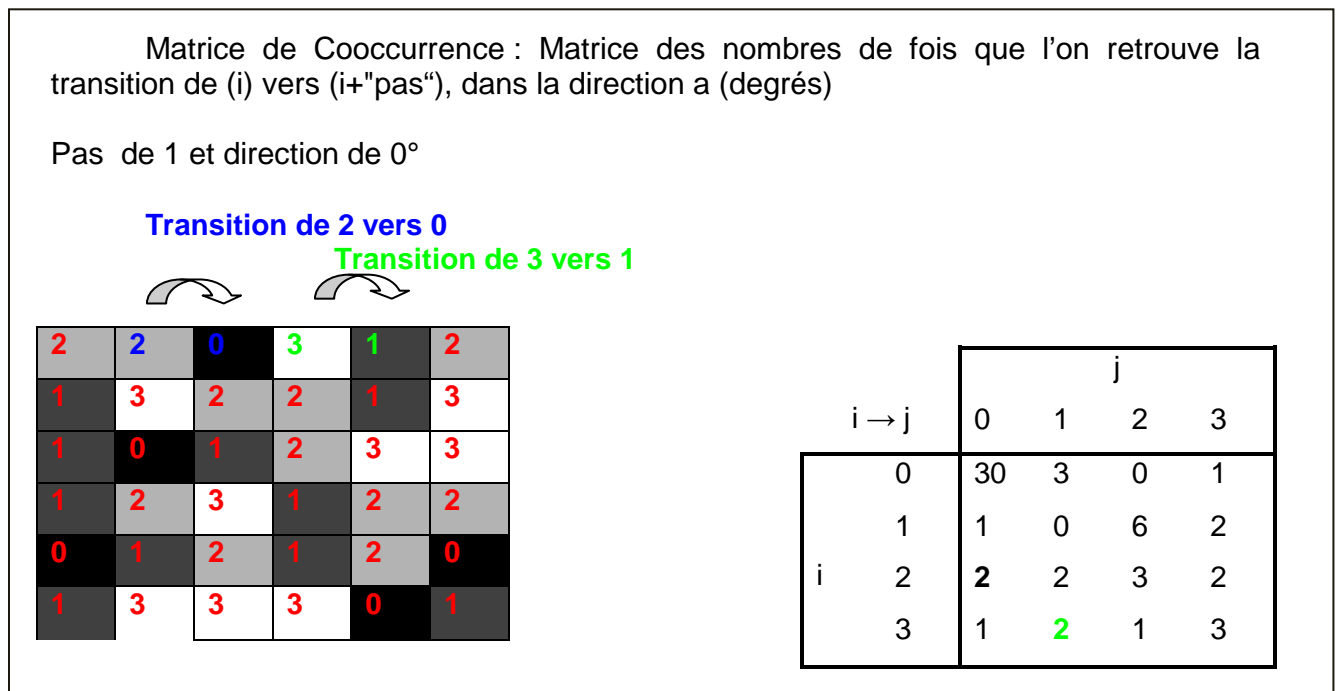


Figure 14 : Principe de construction de la matrice de cooccurrence (d'après C. Lelong, cours mastère SILAT 2007-2008)

Le voisinage du pixel central (Ω) est défini par la taille et par la direction de déplacement de la fenêtre mobile. (Une direction implique deux sens)

Le vecteur de translation, qui établit le déplacement de la fenêtre mobile, est défini par la distance d et les 4 directions qui sont 0°, 45°, 90°, et 135°. De manière similaire aux filtres spatiaux, les indices de textures sont calculés à l'intérieur de la fenêtre mobile (Figure 15) centrée sur chaque pixel de l'image. Le remplacement de la luminance de ce pixel central par l'indice de texture choisi produit une nouvelle image représentant sa distribution spatiale.

Plusieurs études ont été menées pour déterminer une distance ou une orientation optimale. Weszka (1986) a conclu, qu'en pratique, une distance courte donne généralement de bons résultats. La taille de la fenêtre d'analyse, elle, doit satisfaire deux critères contradictoires à savoir, la plus petite possible pour réduire le risque de mélange de textures différentes et, en même temps, la plus grande possible pour pouvoir extraire des statistiques assez robustes et significatives.

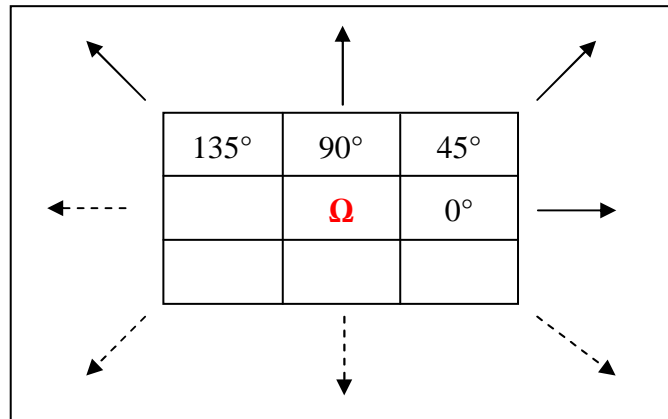


Figure 15 : Fenêtre mobile pour le calcul d'indice de texture.

Nous nous sommes basés sur une analyse empirique des résultats obtenus pour différentes fenêtres.

3.3.2. Choix des indices et des paramètres

Parmi les quatorze indices proposés par Haralick *et al.* (1973), nous en avons retenu quatre pour notre étude, qui sont les plus utilisés en télédétection (Sali & Wolfson, 1992 ; Baraldi & Parmiggiani, 1995 ; Prasad & Gupta, 1998), à savoir : la variance, le contraste, la dissimilitude, et l'entropie.

1- La variance touche à la distribution des niveaux de gris dans le motif. Elle est plus importante dans les zones de cultures et de coupes (en forêt, distribution des niveaux de gris dans le motif est autour de la moyenne).

2- Le contraste est faible dans les zones cultivées. Il représente les changements abrupts de radiométrie dans la zone.

3- La dissimilitude est la quantité d'éléments distincts composant le motif élémentaire, elle représente le niveau de (dés)organisation de la zone. Elle est faible dans les zones cultivées et forte dans les zones urbaines.

4- L'entropie représente la granulométrie de la texture, elle calcule la distribution aléatoire des intensités.

L'information texturale extraite à partir de la matrice de cooccurrence sous ENVI est paramétrée par les grandeurs suivantes : la taille de la fenêtre d'analyse, le pas de déplacement δ , la direction suivant laquelle les deux pixels comparés est choisie et enfin le nombre de niveaux de gris. Afin de fixer ces paramètres, une série de tests utilisant différentes combinaisons a été réalisée. Pour chaque cas, une extraction des 5 indices de texture retenus sur la base d'images quantifiées à 64 niveaux de gris a été effectuée. Une analyse visuelle du contraste des canaux de texture obtenus a permis de constater que, pour une fenêtre de taille donnée et pour le même pas de déplacement δ , la direction de déplacement n'apporte pas de changement significatif. Ceci peut être expliqué par le fait que la texture contenue dans l'image est de type isotrope. Pour l'étude, l'angle de 45° sera conservé, puisqu'il semblerait que nous n'ayons pas de texture orientée sur les images MODIS du Bassin du Bani.

En ce qui concerne la taille de la fenêtre, après observation des images, on a pu définir une fenêtre de 21x21 pixels comme étant « l'unité de paysage topographique » la plus pertinente. A l'aide du SRTM également, en observant les zones de ravines, on peut en déduire qu'un motif d'approximativement 21 pixels sur 21 peut être étudié. Différentes fenêtres ont tout de même été testées, comme le montre l'Annexe 3.

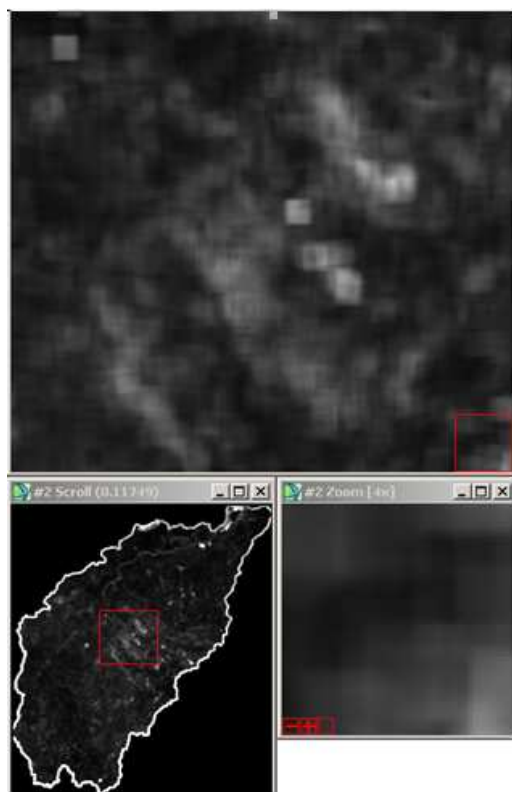
3.3.3. Choix du jeu de données

Après avoir défini les paramètres qui nous ont semblé être les plus optimaux, les manipulations ont été faites sous ENVI, à partir de deux types d'images.

Tout d'abord, des images MODIS sous forme de synthèses NDVI de 16 jours à 250 mètres de résolution ont été soumises au traitement de texture. On peut suivre les différents indices de texture au cours du temps par polygone sous-bassin ou paysage.

Après avoir obtenu quelques résultats, il nous est apparu qu'une texture pouvait être induite par les images elles-mêmes, qui sont des synthèses. En effet, deux pixels voisins proviennent parfois de dates différentes (maximum de NDVI sur les 16 jours), et cette date influence leur compte numérique. L'effet de « synthèse » pourrait donc faire apparaître une texture que nous ne cherchons pas à identifier. Nous avons donc décidé de changer de méthode et de revenir aux images journalières.

Ce sont ainsi sur des images MODIS journalières, à 250 mètres de résolution que nous avons réalisé l'analyse de texture (Figure 16). L'année 2001 a été choisie pour son climat « dans la moyenne », en comparant les 25 années.



Il a été très difficile de trouver des images sans nuage, parmi les 100 initiales sélectionnées. Seules 4 images ont été retenues pour l'année 2001 entière, et 5 images pour l'année 2006.

L'année 2006 sera utilisée pour comparaison, et nous verrons s'il est possible de détecter une évolution de la texture.

Deux nouvelles images à 4 et 5 couches ont donc été traitées sous ENVI, par le filtre de co-occurrence, avec les paramètres mentionnés ci-dessous. 4 images ont été obtenues en sortie, correspondant aux 4 indices de texture considérés. On peut voir ci-contre un exemple : l'indice de variance avec une fenêtre de 21 pixels.

Figure 16 : Exemple d'un indice de variance calculé sous ENVI.

Nous avons ainsi pu tracer l'évolution de ces indices au cours de l'année 2001, par isohyète, par sous-bassin versant ainsi que par paysage, en prenant soin de ne pas inclure les bords du Bani lors de l'extraction des valeurs d'indice.

Les résultats obtenus sont présentés de manière complète (toutes dates confondues en 2001 et 2006, indice de variance) dans l'Annexe 4. Seuls les indices qui dégagent le plus d'information ont été présentés dans la partie Résultats.

Partie 4 : Résultats et discussions

Les résultats sont présentés en deux parties, correspondant aux deux approches mises en œuvre dans cette étude.

- une première partie présente l'évolution des pluies et de l'indice de végétation au cours des 25 années étudiées et la modélisation de la relation entre la pluie et le NDVI pour les différents segments. L'objectif est ici de voir si les calculs effectués avec le CEP nous permettent de nous affranchir de l'effet « pluies » et d'étudier l'évolution de l'occupation du sol au cours du temps.

- la deuxième partie consiste à présenter et interpréter les résultats concernant les analyses de texture. Les variations d'amplitudes de l'indice de variance par paysage sont discutées.

4.1. Résultats NDVI-pluies

4.1.1. Evolution Pluies

Sur la période 1982-2006, et sur l'ensemble du Bani, les pluies apparaissent relativement irrégulières d'une année sur l'autre, comme le montre la Figure 17. On peut par contre noter que la décennie 1990-2000 est plus humide, ce que nous avons pu confirmer par la littérature (Mahé & Olivry, 1998).

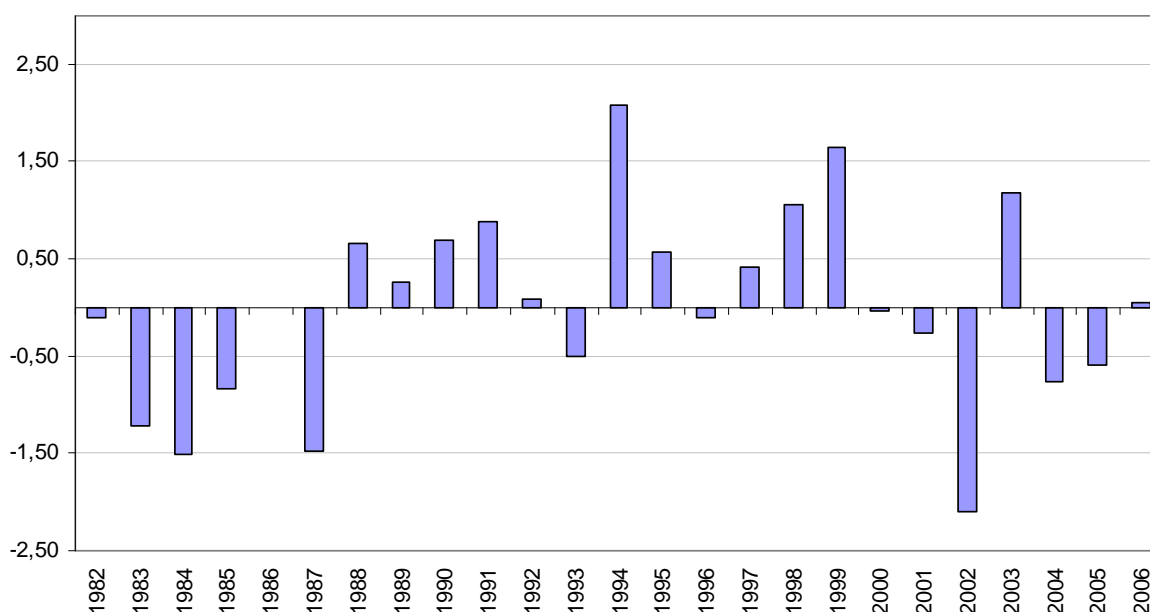


Figure 17 : $(P_i - P_{moy})/Ecartype$, en moyenne de pluies annuelles sur les 17 stations du Bani choisies pour l'étude.

Les données de pluies ont également été analysées à l'échelle de la station, au pas de temps mensuel et annuel.

On peut noter qu'en somme annuelle, la pluviométrie des stations des sous-bassins du Sud est deux fois plus importante que celle des stations des sous-bassins du Nord (Figure 18). En effet, le sous-bassin 1 est situé en zone soudano-sahélienne, où les pluies annuelles sont inférieures à 800 mm. Le sous-bassin 7 se situe en zone

soudano-guinéenne, beaucoup plus humide. Les stations choisies par sous-bassin sont celles décrites dans le Tableau 2.

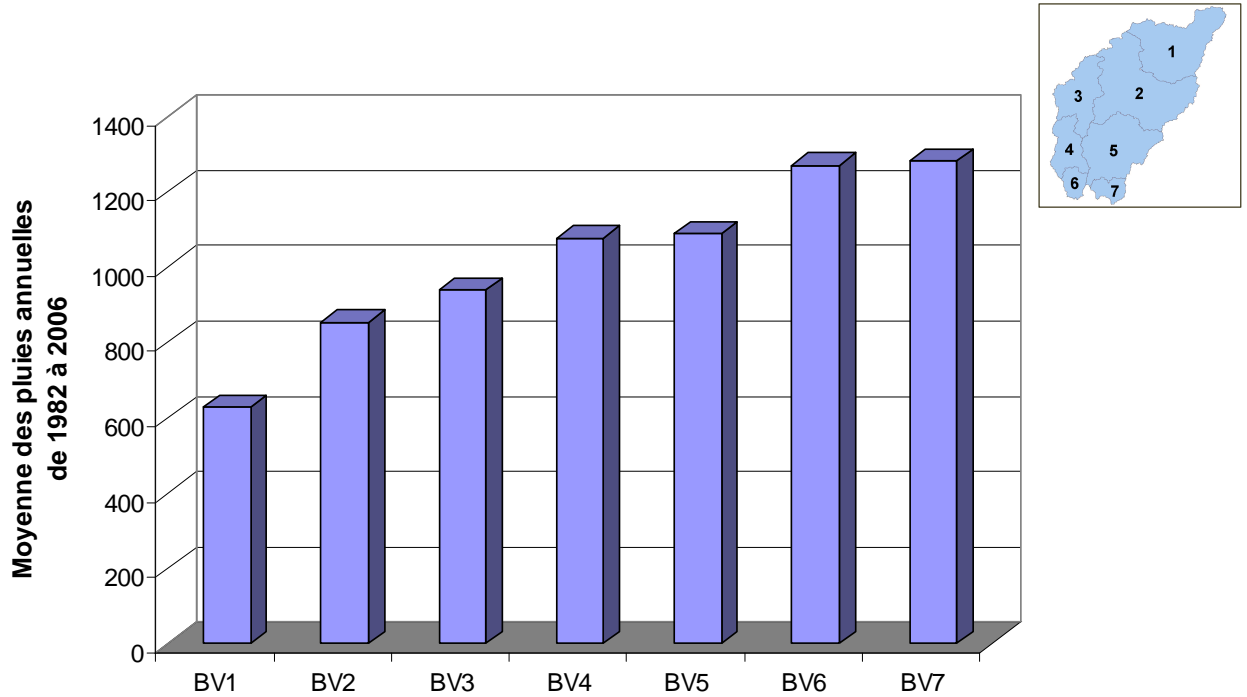


Figure 18 : Pluviométrie annuelle par sous bassins du Bani

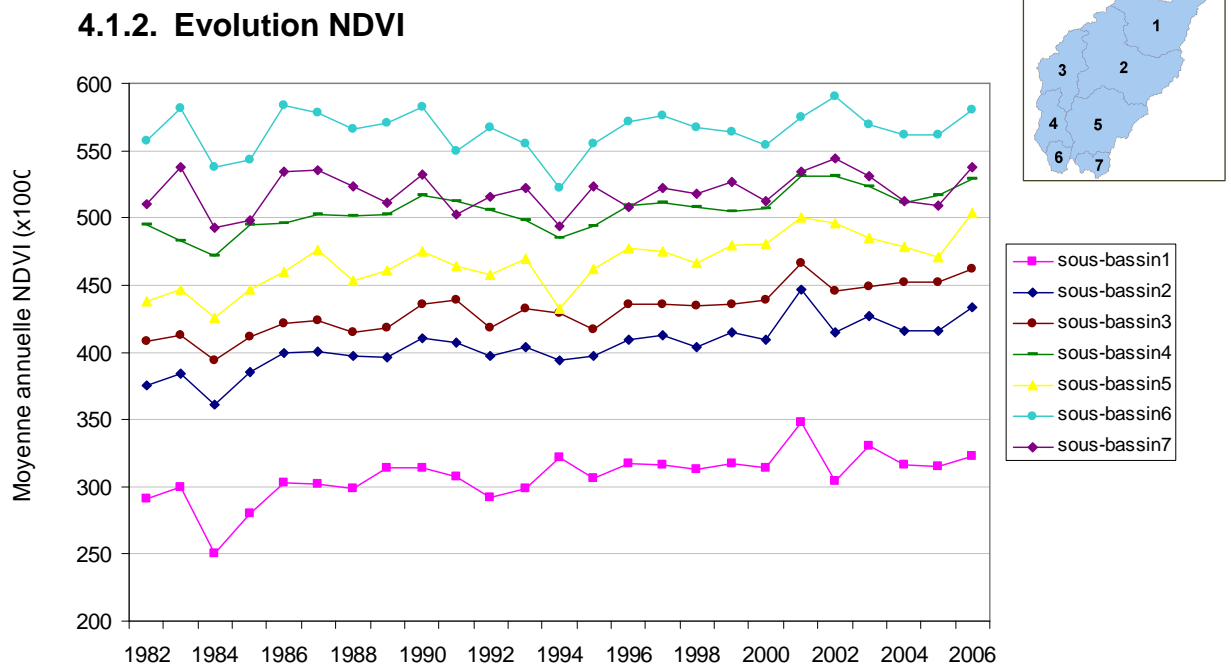


Figure 19 : Evolution du NDVI moyen par sous bassin-versant, moyenne annuelle sur la période 1982-2006

Nous pouvons voir sur la Figure 19, l'évolution du NDVI annuel moyen par sous-bassin au cours des 25 années étudiées. On remarque la présence du gradient latitudinal climatique du Bani. Le sous-bassin 1, qui est le sous-bassin le plus au Nord, et

donc le plus sec, voit son NDVI augmenter à hauteur de 11,1% (Tableau 3), entre la période 1982-1988 et la période 2000-2006, avec un NDVI moyen de l'ordre de 0.3. Les sous-bassins 6 et 7 par exemple, ont des valeurs de NDVI deux fois supérieures. La tendance semble être encore une fois une très légère augmentation (environ 1%). Cette zone Sud du Bani est occupée en partie par de la forêt, ou de la savane arbustive et donc par une végétation permanente, qui a un indice de végétation élevé toute l'année.

	NDVI 1982-1988	NDVI 2000-2006	Augmentation en %
BV1	0,29	0,32	11,1
BV2	0,39	0,42	9,6
BV3	0,41	0,45	9,7
BV4	0,49	0,52	5,9
BV5	0,45	0,49	8,6
BV6	0,56	0,57	1,1
BV7	0,51	0,52	1,4

Tableau 3 : Augmentation du NDVI par sous-bassin entre 1982 et 2006

On retrouve ces résultats au pas de temps mensuel également (Figure 20). La valeur minimale du sous-bassin 1 est de 0.2, celle du sous-bassin 6 est de 0.4. Là aussi nous retrouvons l'influence de la végétation permanente sur le NDVI des sous-bassins du Sud du Bani. D'autre part, l'évolution au cours de l'année est différente pour chacun des bassins. On peut noter que pour les bassins les plus au Nord (1, 2 et 3), la croissance de la végétation se fait beaucoup plus rapidement (la pente est plus importante).

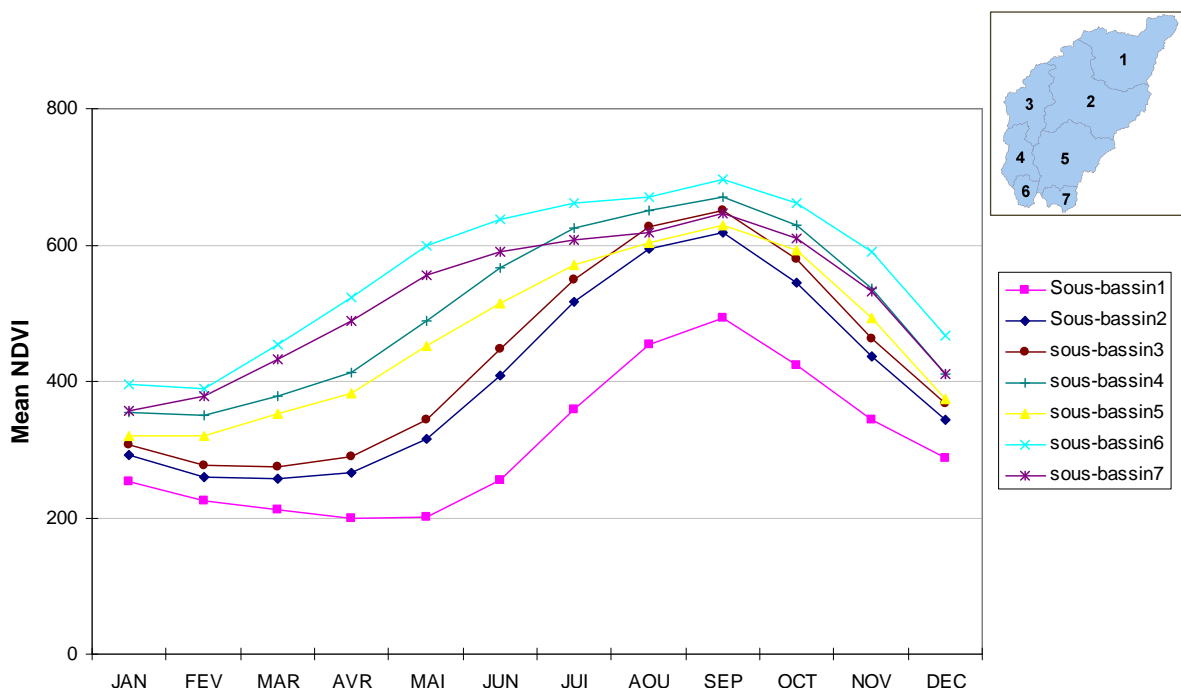


Figure 20 : Evolution du NDVI moyen par sous-bassin, moyenne mensuelle sur la période 1982- 2006

4.1.3. Relation NDVI-pluies

Pas de temps annuel

Au pas de temps annuel, plusieurs méthodes ont été testées, comme le montre l'Annexe 6. Les tendances sont difficiles à dégager. Nous avons donc pensé qu'il serait possible d'obtenir des résultats grâce à l'efficacité pluviométrique. En effet, l'efficacité d'un paysage évolue au cours du temps en fonction de la pluie et des activités anthropiques. En modélisant l'évolution de l'efficacité en fonction des pluies, nous pensons pouvoir corriger l'évolution de l'efficacité au cours du temps, comme expliqué dans la partie 3, pour que son évolution reflète uniquement les changements d'occupation du sol. Les résultats de l'efficacité seront présentés dans la partie 4.1.4.

Pas de temps mensuel

Au pas de temps mensuel, en moyennant les résultats sur les 25 ans, les résultats pour les sous-bassins 1 et 7 sont présentés sur la Figure 21. Nous voyons donc que pour deux bassins extrêmes du Bani, avec un sous-bassin au Nord (1) et un sous-bassin au Sud (7), les réactions du NDVI aux pluies sont différentes. Pour le sous-bassin 1, le NDVI atteint son maximum en septembre, c'est-à-dire un mois après la plus grosse pluie annuelle. Le NDVI croît très rapidement, et paraît suivre l'évolution de la pluie, avec un décalage d'un mois. En ce qui concerne le sous-bassin 7, les pluies s'étalant sur toute l'année, le NDVI croît également en cohérence avec la pluie, mais de manière moins « réactive ». Il reste plus stable. La végétation permanente qui occupe principalement le sous-bassin 7 est moins dépendante des pluies que les cultures annuelles qui occupent le sous-bassin 1 à plus de 50%.

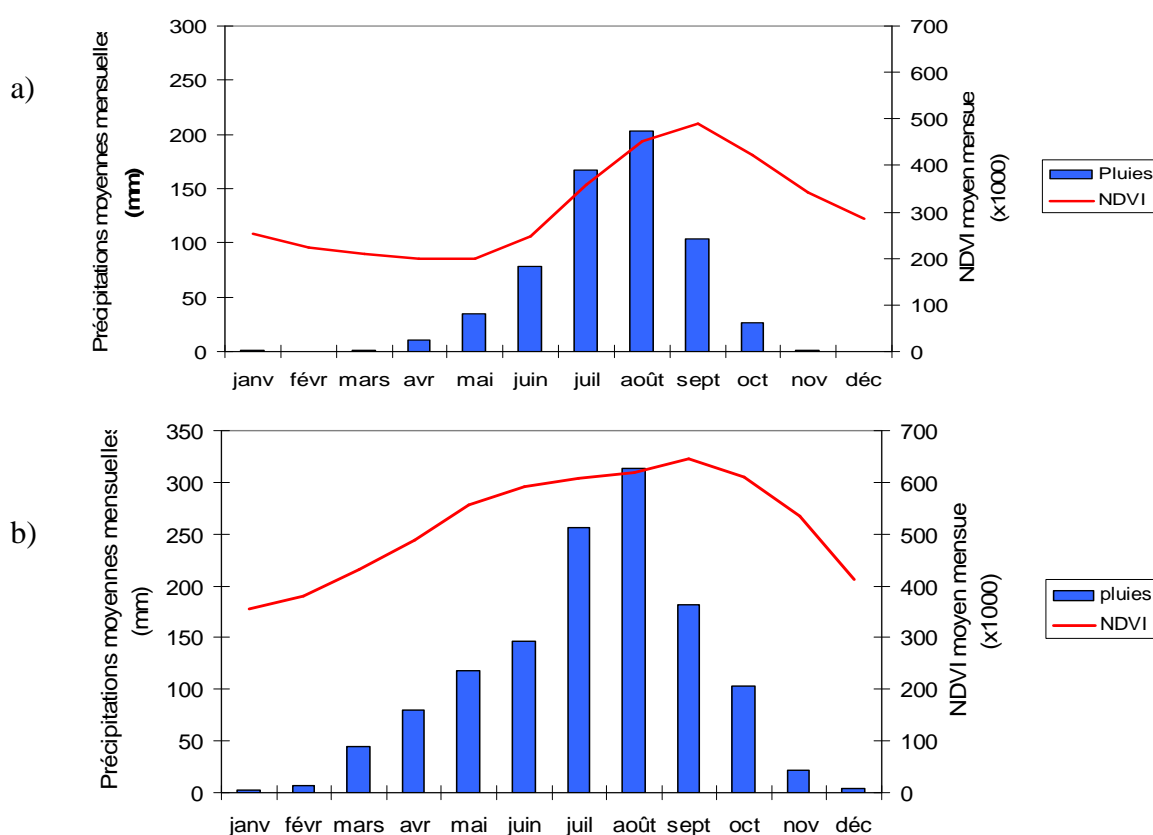


Figure 21 : Variation saisonnière du NDVI et des pluies par sous-bassins. (a) sous-bassin 1 et (b) sous-bassin 7.

Les résultats par paysage confirment nos premiers résultats. (Figure 22). On peut remarquer que les réactions aux baisses de pluies sont différentes pour les 3 types de paysages. Pour le paysage 1, constitué majoritairement de cultures, et pour le paysage 2, de savane, la végétation rentre en phase de sénescence dès que les précipitations commencent à diminuer. Pour le paysage 3, constitué de savane arborée et de forêt, on peut observer une plus grande stabilité, même après la grosse pluie annuelle : d'août à octobre, le NDVI varie de 0.5, alors même qu'il varie de 0.15 pour le paysage 1 à la même période. La réaction aux variations des pluies est ainsi plus lente, et de moins grande amplitude.

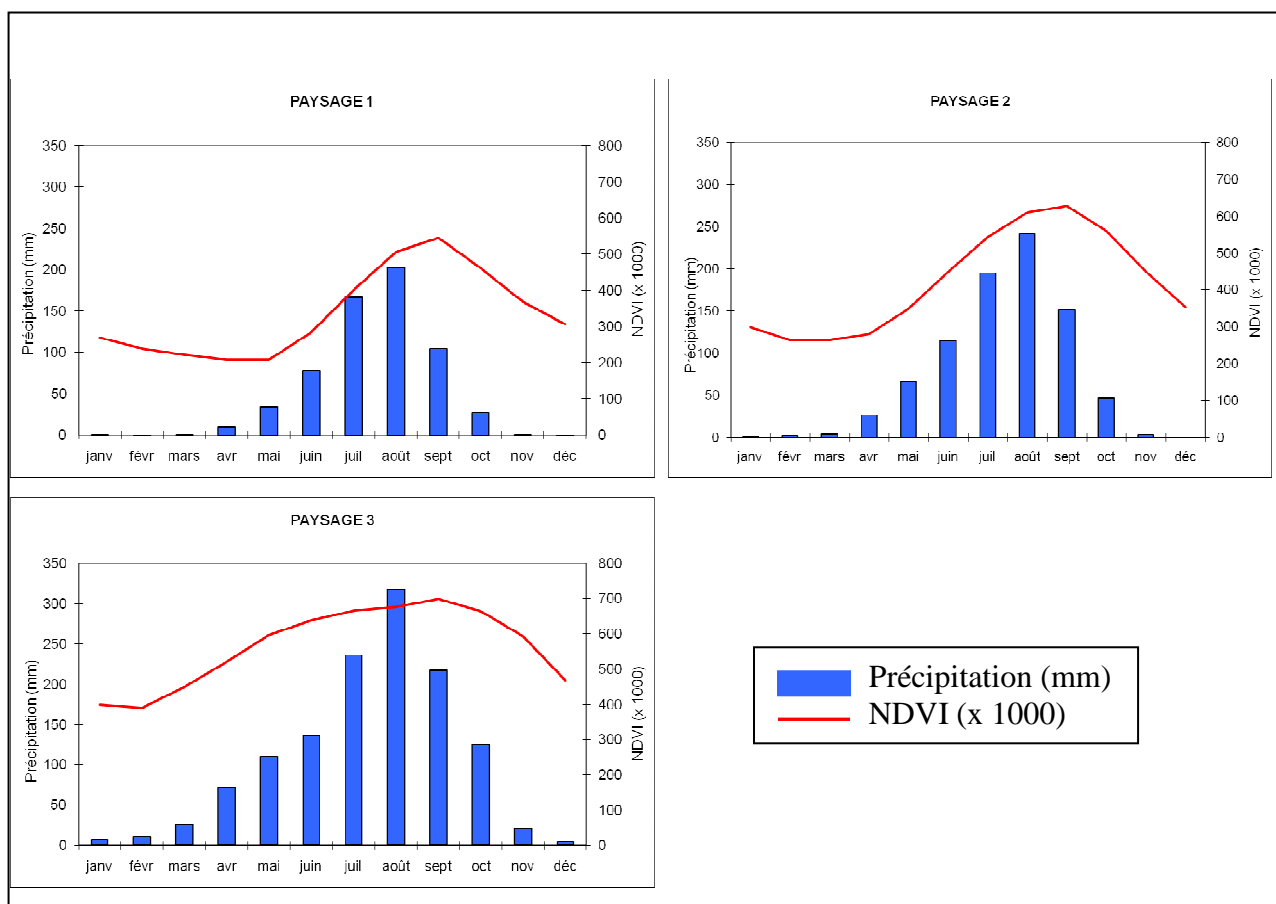


Figure 22 : Variation saisonnière du NDVI et des pluies par type de paysages.

En considérant maintenant un autre type de représentation, nous pouvons voir sur la Figure 23 que 2 populations se dégagent pour le paysage 1. Cette démarcation se veut moins importante pour le paysage 2, et n'apparaît pas pour le paysage 3. Après analyse, nous avons remarqué que les points situés dans la partie supérieure correspondaient aux mois de mai à octobre, c'est-à-dire aux mois de saison des pluies, de croissance de la végétation. La question est donc : pourquoi cette distinction ne peut-elle pas se faire pour un paysage situé au Sud du Bani ?

Comme on pouvait d'y attendre, il apparaît clairement une différence plus importante entre saison sèche et saison des pluies dans le Nord du Bassin.

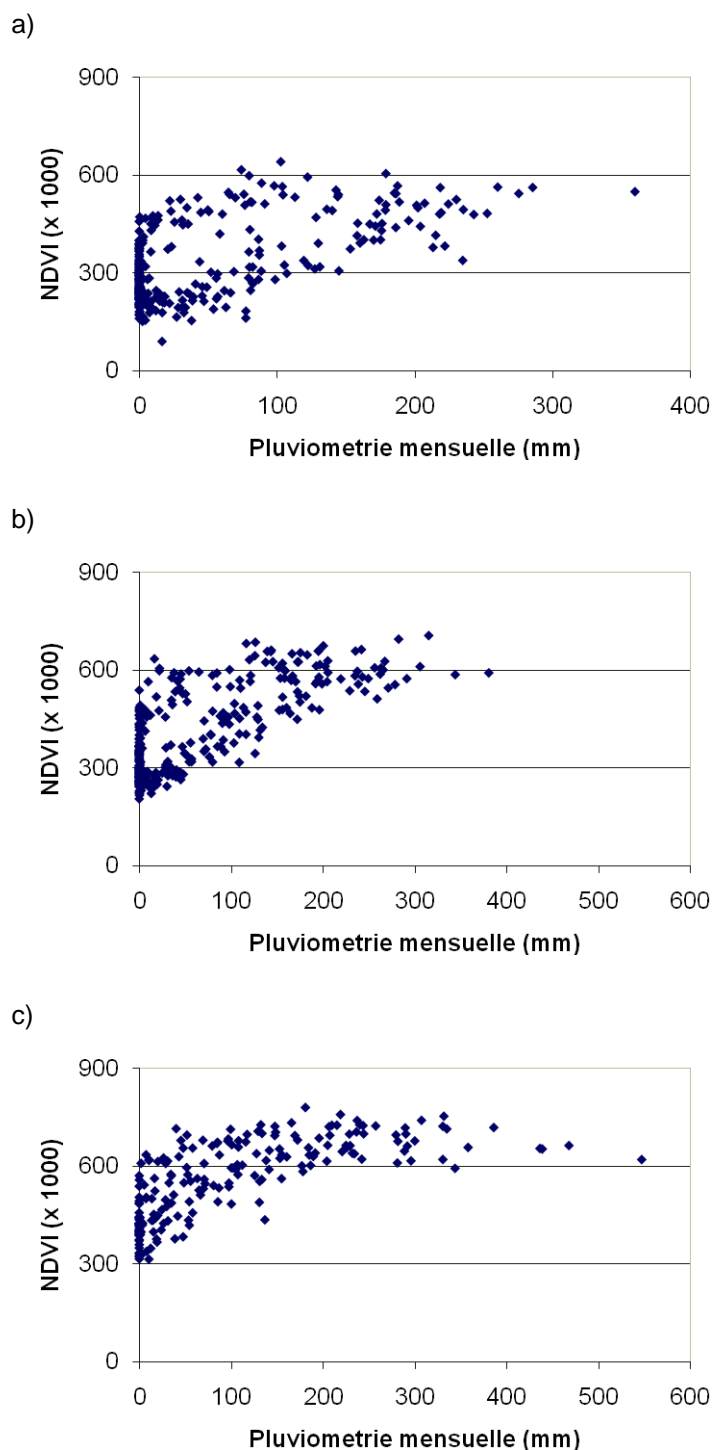


Figure 23 : Evolution du NDVI mensuel en fonction des pluies mensuelles, par type de paysage. (a) paysage 1 = zone dominée par les cultures. (b) paysage 2 = zone dominée par les savanes ouvertes à fermées. (c) paysage 3 = zone dominée par les savanes arbustives à arborées et les forêts sèches.

Décalage d'un mois et modélisation

Nous avons ensuite travaillé avec un décalage d'un mois, pour relier la valeur du NDVI à celle de la pluie du mois précédent. Ce décalage nous a permis de supprimer l'écart entre les deux populations dont nous avons parlé ci-dessus. En utilisant le logiciel R, nous avons obtenu les résultats suivants (Figure 24), par sous-bassin :

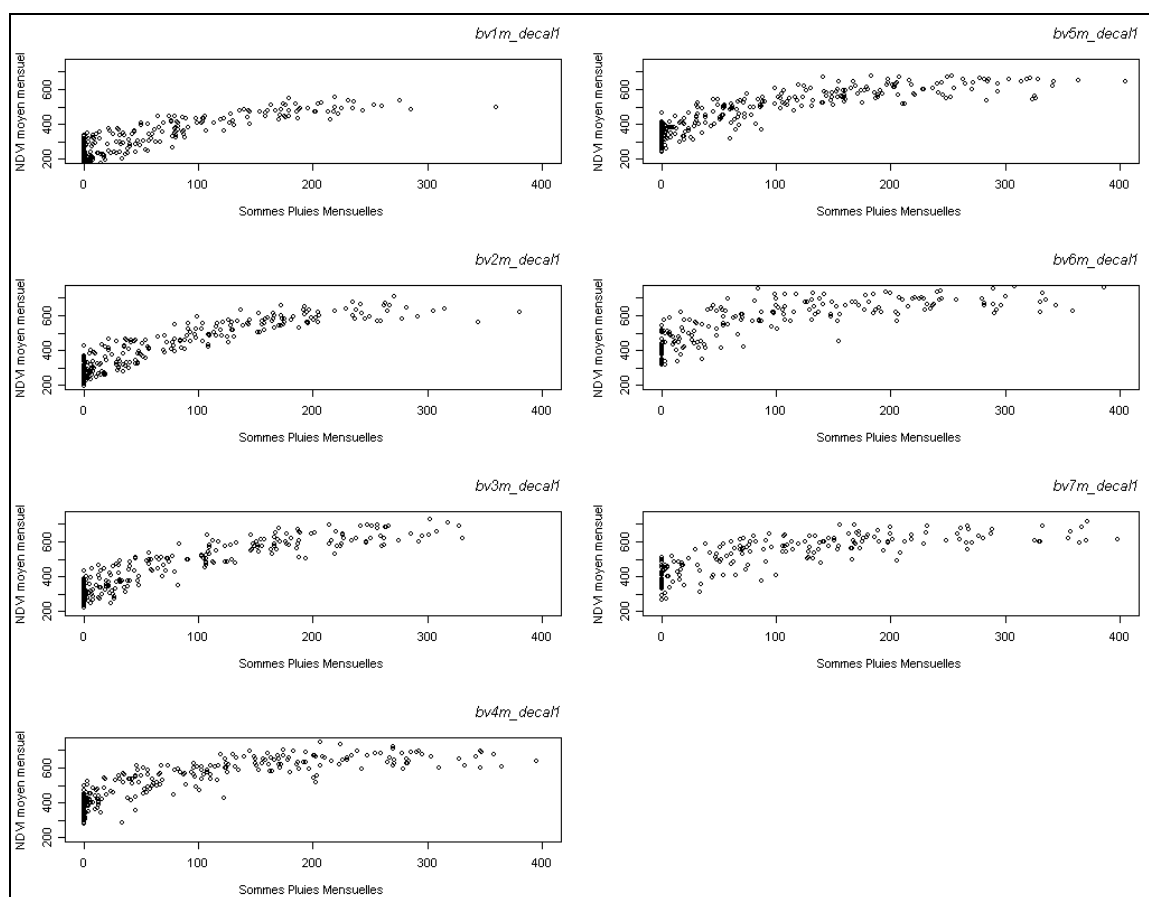


Figure 24 : NDVI en fonction des pluies par sous bassins, décalage d'un mois

Les tendances ne semblent pas linéaires, mais nous voyons disparaître l'écart entre les 2 populations que nous avons précédemment. Nous avons ensuite modélisé ces relations.

Pour chaque sous-bassin, on lance les commandes indiquées en Annexe 5 sur R. Les relations entre pluies et NDVI par sous-bassin sont modélisées par une courbe de type :

$$Y = a * (1 - b * \exp(-c * x))$$

Les résultats sont les suivants (Tableau 4) :

	Bv1	Bv2	Bv3	Bv4	Bv5	Bv6	Bv7
a	575	678	679	660	641	685	640
b	0.604	0,588	0,559	0,425	0,470	0,388	0,392
c	$6,812 \cdot 10^{-3}$	$7,632 \cdot 10^{-3}$	$8,631 \cdot 10^{-3}$	$1,332 \cdot 10^{-2}$	$9,87 \cdot 10^{-3}$	$1,392 \cdot 10^{-2}$	$1,146 \cdot 10^{-2}$
RMSE	46.04 (296 ddl)	45.44 (296 ddl)	48.02 (296 ddl)	49.61 (296 ddl)	45.48 (296 ddl)	62.46 (200 ddl)	55.94 (200 ddl)

Tableau 4 : Modélisation sous R : relations pluies-NDVI avec décalage d'un mois

La Figure 25 montre la modélisation des relations pluies-NDVI par sous-bassin avec décalage d'un mois.

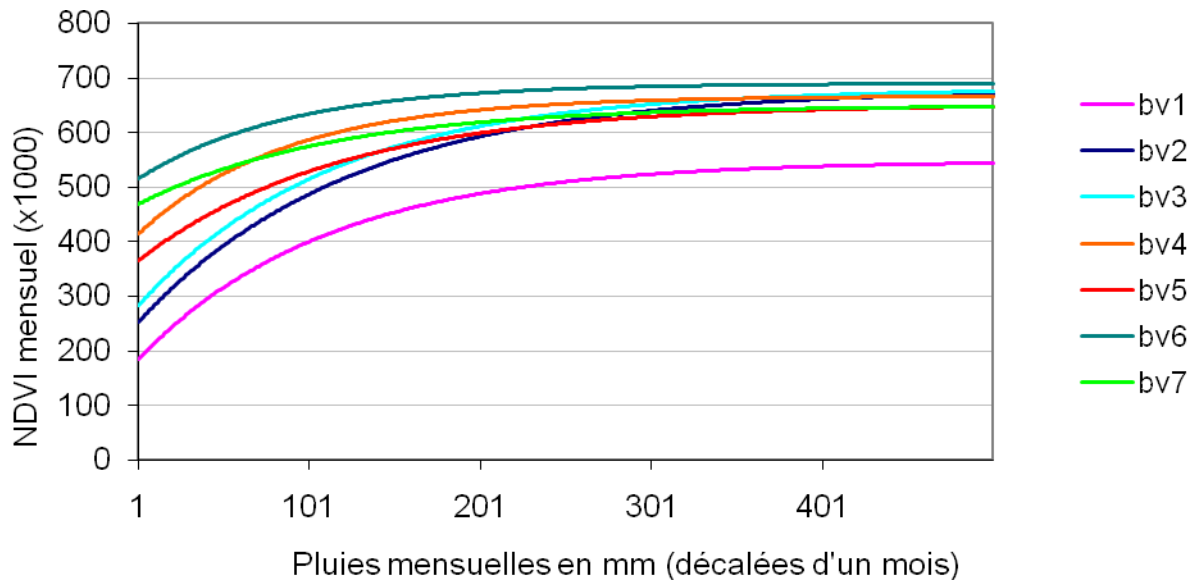


Figure 25 : Modélisation des relations pluies-NDVI par sous-bassin avec décalage d'un mois

La modélisation avec R fournit des résultats statistiques et notamment, un p-value très faible (<0.05) pour les 7 régressions. Nous pouvons donc conclure que les résultats sont statistiquement significatifs.

Nous avons donc une relation pluies-NDVI différente pour chaque sous-bassin, au pas de temps mensuel.

4.1.4. Efficience pluviométrique

Pas de temps annuel

Conformément à ce que nous avons lu dans la littérature, nous avons commencé par analyser les résultats du calcul d'efficience annuelle par paysage. Ce découpage a permis d'analyser l'efficience d'une zone homogène en termes d'occupation du sol. Nous avons ensuite testé s'il était possible d'analyser des tendances au niveau du sous-bassin versant.

Il existe deux méthodes différentes pour l'efficience annuelle : une première méthode utilisant comme numérateur le NDVI maximum annuel (Hountondji, 2006) une seconde méthode utilisant une somme de NDVI (Prince *et al.*, 1998), comme nous l'avons vu dans la partie d'analyse bibliographique. La pluviométrie utilisée dans la méthode 1 est la somme des pluies de Mai à Août.

$$\text{Eff. Pluvio (1)} = \frac{NDVI(\text{max annuel})}{\sum_{\text{Mai}}^{\text{Aout}} \text{Pluies}} \quad \text{et} \quad \text{Eff. Pluvio (2)} = \frac{\sum_{\text{Janvier}}^{\text{Décembre}} NDVI}{\sum_{\text{Janvier}}^{\text{Décembre}} \text{Pluies}}$$

Les résultats sont présentés sur la Figure 26 et la Figure 27.

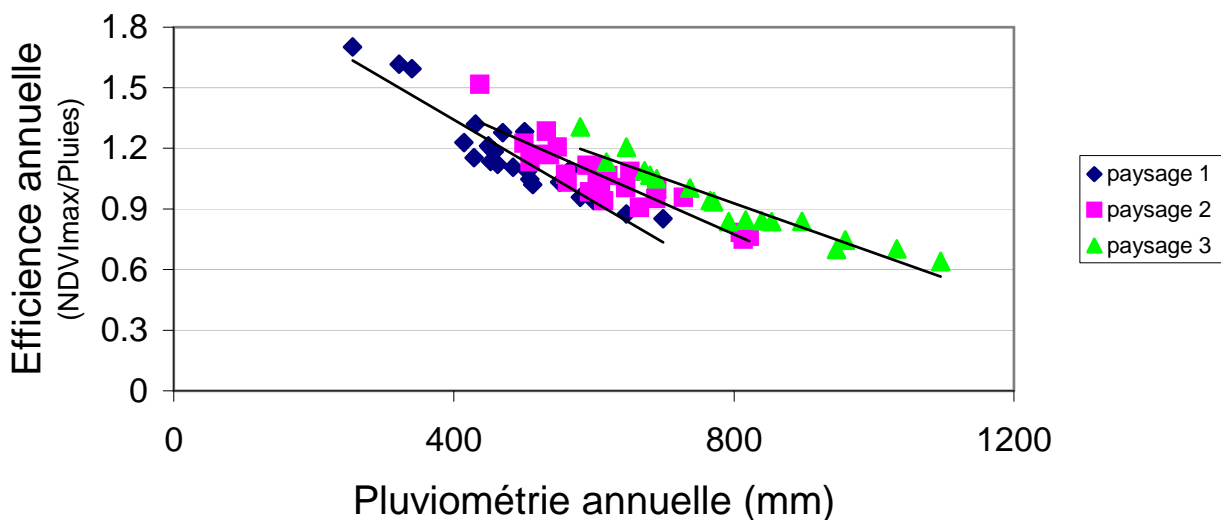


Figure 26 : Efficacité annuelle par paysage, en fonction des pluies, méthode 1

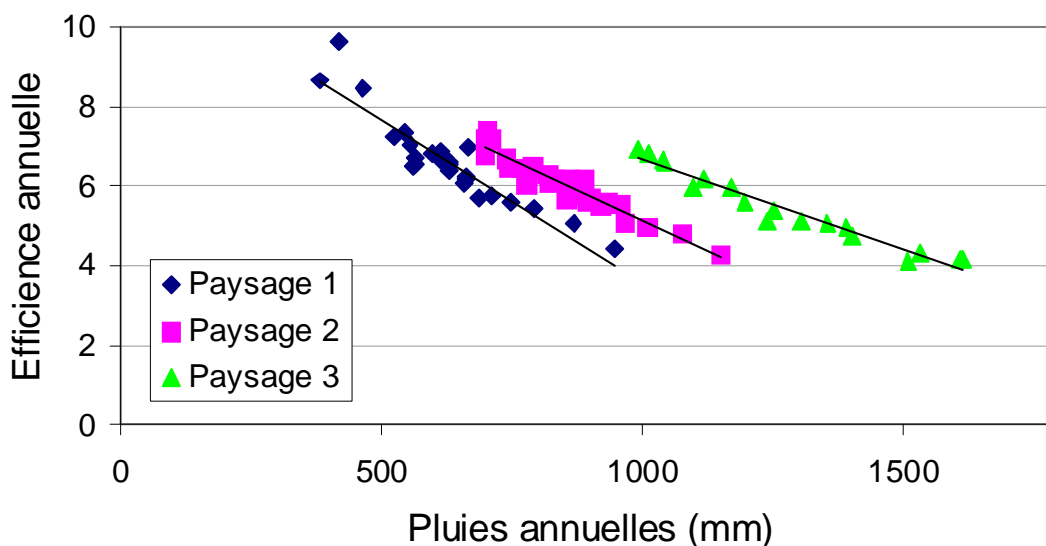


Figure 27 : Efficacité annuelle par paysage, en fonction des pluies, méthode 2

Après avoir tracé des courbes de tendance, et observé les coefficients, ainsi que le R^2 (Annexe 7), nous pouvons en déduire que la méthode 2 permet de mieux mettre en évidence les différences d'efficacité annuelle par paysage. Nous l'utiliserons donc pour modéliser l'efficacité de la pluie par paysage.

Les efficacités par sous-bassin et par paysage, calculées sur des images SPOT-VEGETATION, ont également été utilisées pour voir s'il existait un effet résolution sur la relation Efficacité-pluviométrie. Les efficacités issues des données SPOT sont très proches des efficacités calculées avec les images NOAA-AVHRR (Annexe 7). Le changement de résolution ne modifie donc pas les résultats en termes d'efficacité pluviométrique sur le Bani.

Efficienc e pluviométrique annuelle corrigée et évolution au cours du temps

Au pas de temps annuel, nous avons pu modéliser la relation entre l'efficienc e d'un paysage et la pluviométrie sur ce paysage. Le modèle utilisé est une régression linéaire. Cette modélisation est meilleure dans le cas de la méthode 2. Nous allons donc utiliser cette régression linéaire pour corriger l'évolution de l'efficienc e au cours du temps, comme expliqué dans la partie 3, afin de nous affranchir de l'effet de la pluie.

En comparant avec l'efficienc e annuelle sans correction (Figure 28), nous voyons que celle-ci était très instable, avec des diminutions fortes entre 1990 et 2000, la décennie la plus sèche de la période considérée. Les données de pluies sur le Sud du Bani s'arrêtant en 1999, nous avons suivi l'efficienc e du paysage 3 jusqu'en 1999.

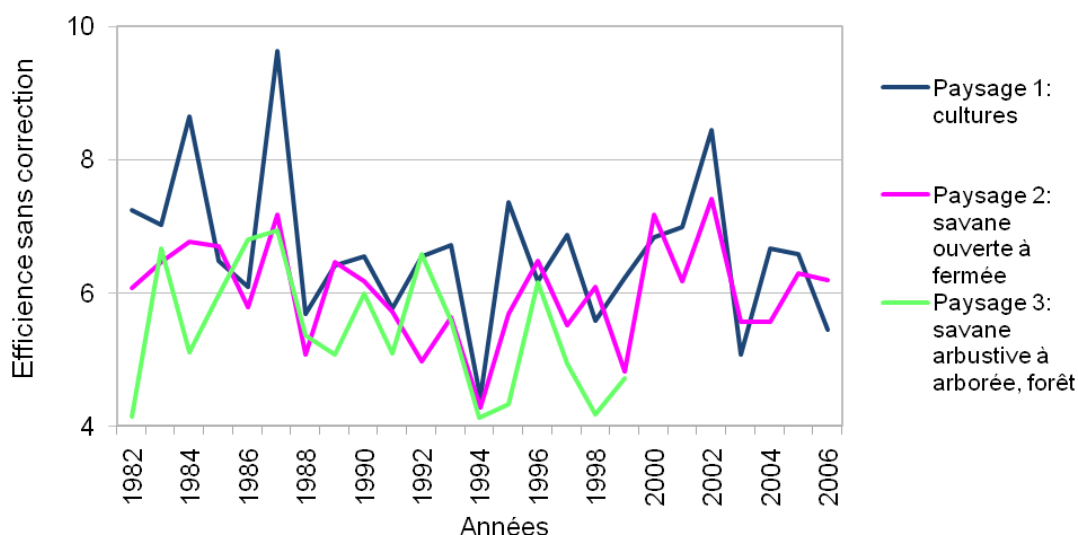


Figure 28 : Efficienc e pluviométrique annuelle, par paysage avant normalisation par la pluie.

L'efficienc e annuelle normalisée présente moins de dispersion (Figure 29). Nous voyons cependant que l'évolution des paysages 1 et 2 est en légère augmentation entre 1982 et 2006.

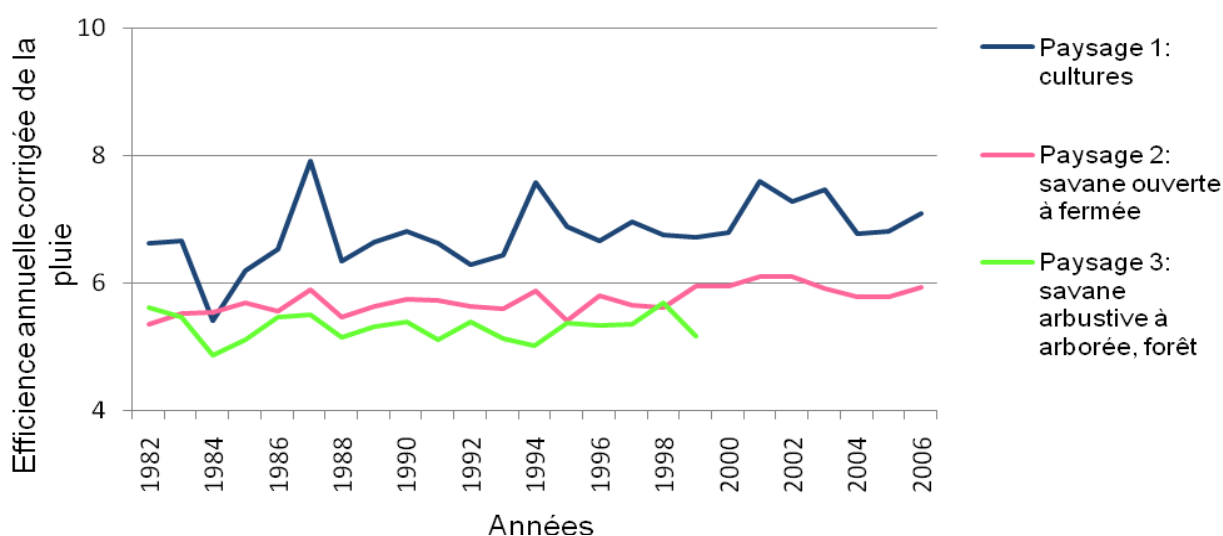


Figure 29 : Efficienc e pluviométrique annuelle normalisée, par paysage.

Nous réitérons les mêmes traitements sur les sous-bassins et après correction, nous obtenons la carte suivante (Figure 30). L'évolution des efficacités par sous-bassin est présentée en Annexe 8.

Evolution de l'efficacité pluviométrique normalisée de 1982 à 2006 sur le bassin du Bani

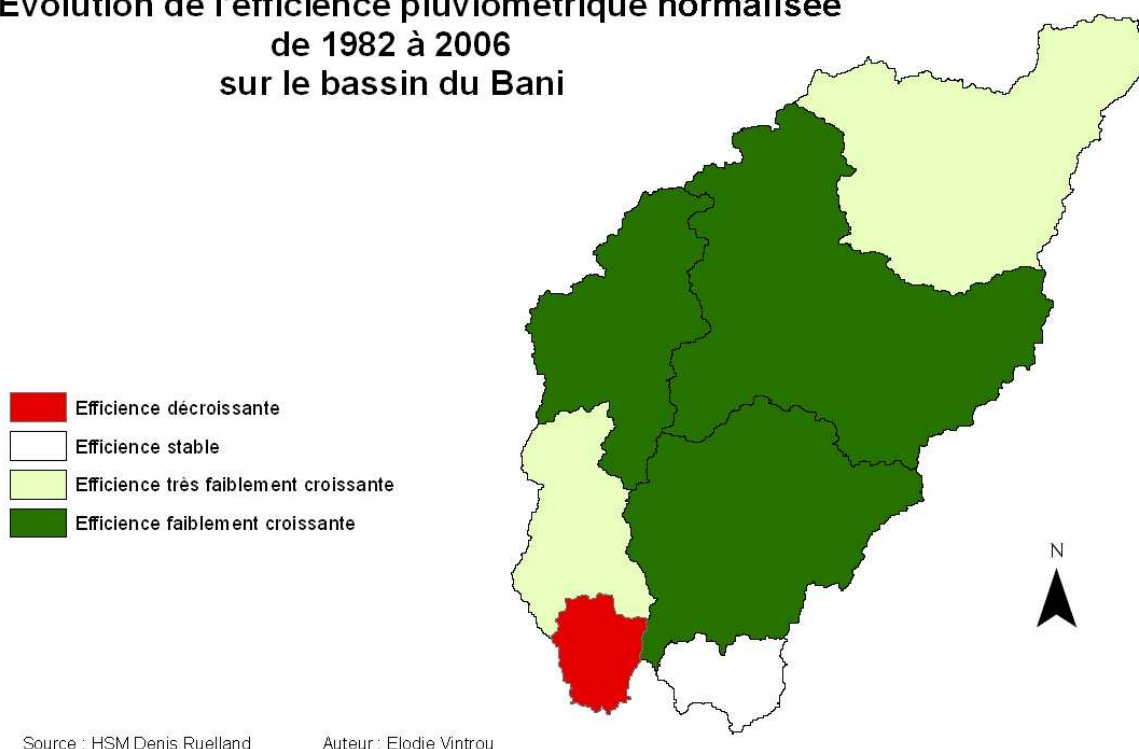


Figure 30 : Evolution de l'efficacité pluviométrique de 1982 à 2006 sur le bassin du Bani

Nous pouvons donc voir sur cette carte que l'efficacité est stable ou en augmentation sur la majorité des sous-bassins. Le bassin 6 est le seul bassin dont l'efficacité diminue au cours du temps. Les bassins qui présentent la plus forte augmentation d'efficacité, sont les bassins 2, 3 et 5.

Pas de temps mensuel

Le pas de temps mensuel permet de dégager d'autres caractéristiques importantes.

Les trois graphiques d'efficacités mensuelles ci-dessous font une nouvelle fois apparaître les deux populations correspondant aux différences entre saison sèche et saison des pluies, principalement pour les paysages 1 et 2 (Figure 31).

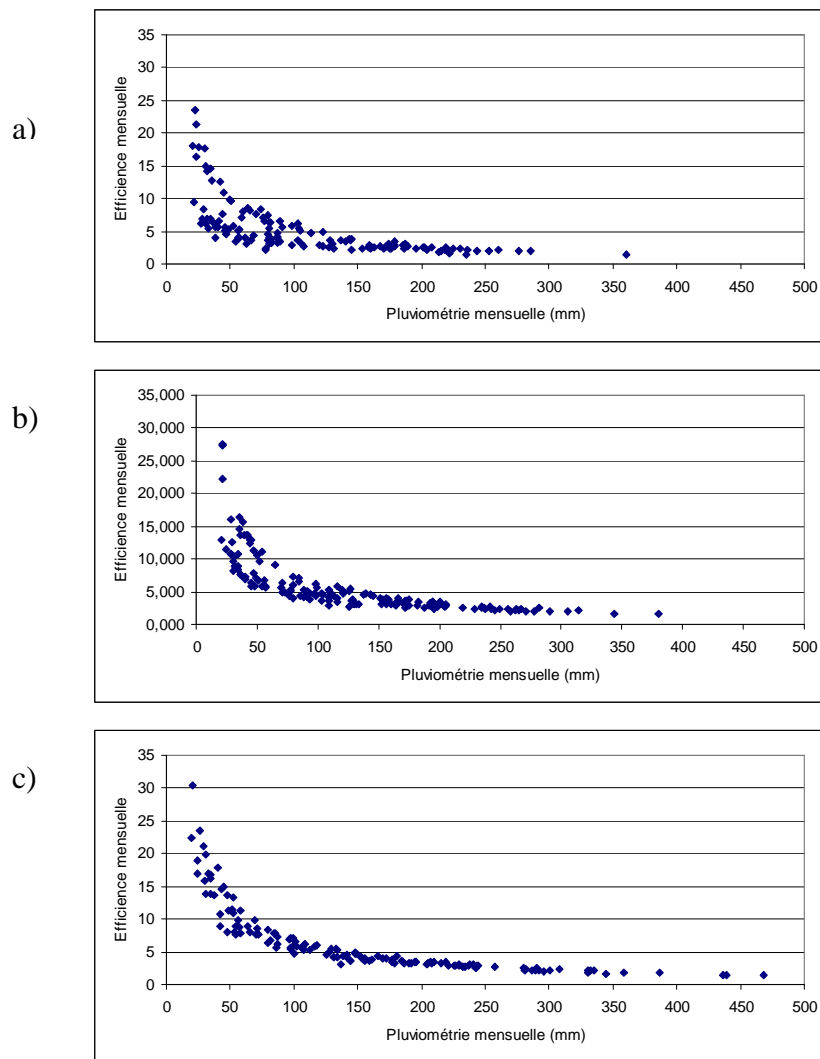


Figure 31 : Efficience pluviométrique mensuelle en fonction des pluies, par paysage : (a) paysage 1 = zone dominée par les cultures. (b) paysage 2 = zone dominée par les savanes ouvertes à fermées. (c) paysage 3 = zone dominée par les savanes arbustives à arborées et les forêts sèches.

En séparant les deux périodes de saisons sèche et humide, nous pouvons modéliser les relations par paysage. Nous pouvons déjà remarquer sur la Figure 32 que les différences entre paysages sont détectables pendant la période 1, c'est-à-dire la période de croissance de la végétation, de mars à septembre. Ces courbes d'efficience ont ensuite été modélisées avec le logiciel R (Figure 33).

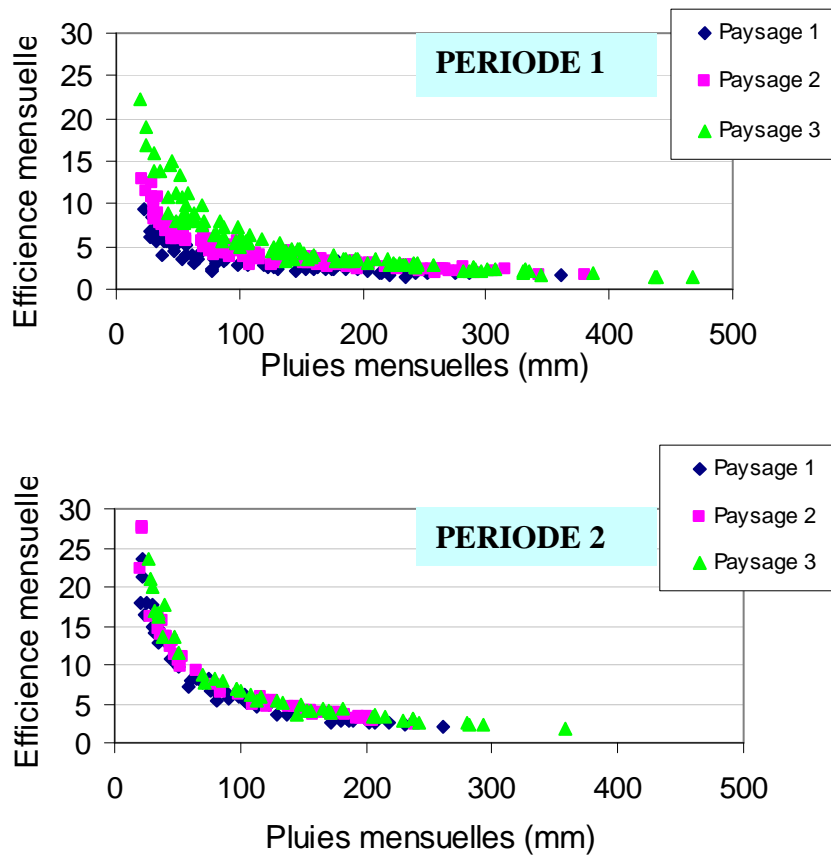


Figure 32 : Efficience pluviométrique en fonction des pluies, pas de temps mensuel, par paysage. Période 1 = jusqu'à la plus grosse pluie. Période 2 = décroissance des pluies.

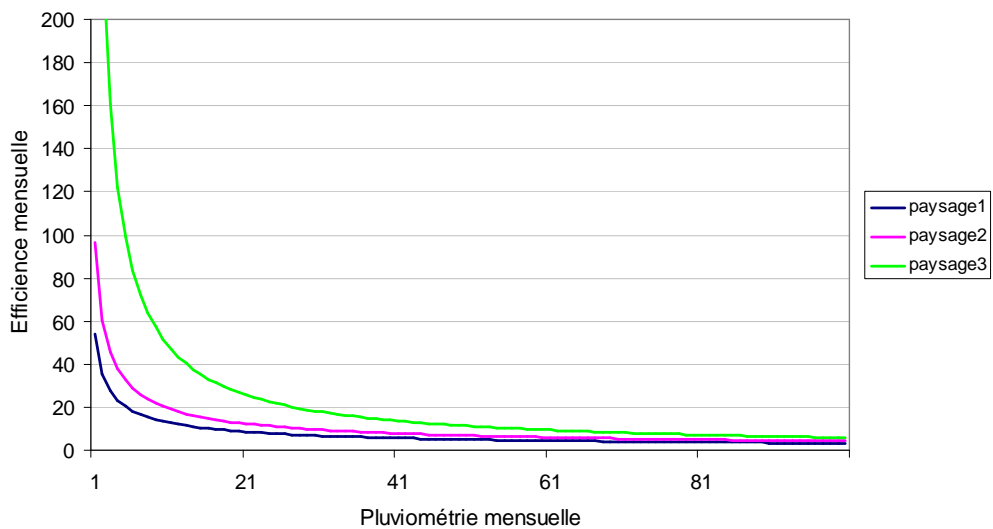


Figure 33 : Modélisation de l'efficience par paysage en fonction de la pluviométrie sur la période 1, période de croissance.

Les 3 équations modélisées sont les suivantes :

Equation paysage 1 : $y=54.2*x^{(-0.608)}$

Equation paysage 2 : $y=96.4*x^{(-0.676)}$

Equation paysage 3 : $y=453.1*x^{(-0.944)}$

Nous pouvons remarquer sur les figures précédentes que l'efficacité du paysage 3 est toujours plus élevée que celle du paysage 1. Or, nous pensons que le paysage 1 devrait avoir une efficacité plus grande : en effet, les cultures « rentabilisent » mieux la pluie qu'une végétation permanente, c'est-à-dire que pour une faible quantité de pluies, les cultures commencent à pousser, alors que la végétation permanente doit rester quasiment stable tout au long de l'année. Nous avons donc pensé que cette erreur pouvait être due au NDVI minimum de chaque type de paysage. En effet, le paysage 1 a un NDVI minimum moyen sur les 25 ans de 0.2, contre un NDVI de 0.4 pour le paysage 3. Cette valeur pourrait entraîner les décalages que nous voyons sur la Figure 32 en période 1.

Ces résultats seront discutés en fin de partie.

4.2. Résultats de l'analyse texturale

Nous avons étudié l'évolution de la texture d'images MODIS, pour essayer de détecter un changement d'occupation du sol. Nous avons ainsi pu tracer l'évolution de ces indices au cours de l'année 2001 et de l'année 2006, par isohyète, par sous-bassin versant ainsi que par paysage.

Nous avons pris ici seulement 4 bassins et l'indice de variance pour simplifier la représentation (Figure 34).

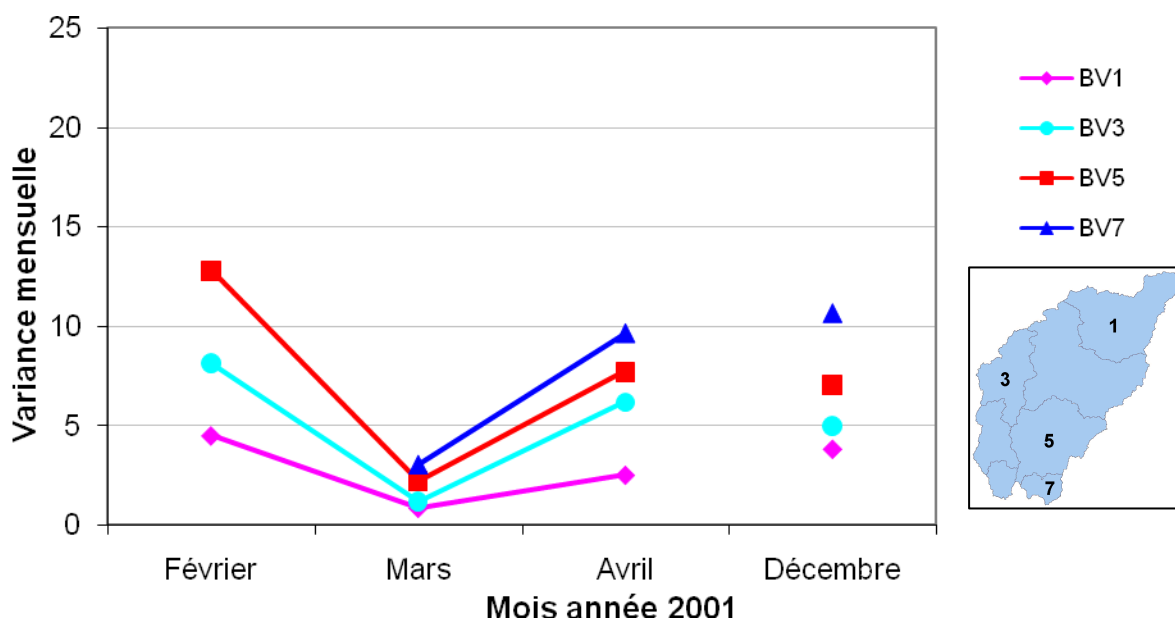


Figure 34 : Evolution de l'indice de variance par sous-bassin du Bani au cours de l'année 2001

Nous pouvons donc observer sur la Figure 34 que l'évolution de l'indice de variance au cours de l'année 2001 est très hétérogène. Les 4 images retenues pour la présentation des résultats sont des images dépourvues de nuages. Nous avons en effet remarqué qu'en conservant toutes les images que nous pensions relativement propres, nous obtenions des variances faussées par les nuages présents. Un petit nuage très épais fait augmenter considérablement la variance à l'intérieur du sous-bassin ou du paysage, alors qu'un nuage fin, étendu, fait l'effet d'un voile, et homogénéise la variance.

Il est donc difficile d'analyser les différentes amplitudes de la Figure 34. Pour le bassin 7, le plus au Sud, l'indice de variance paraît être plus élevé que pour le sous-bassin 1, pour les quelques dates considérées. Ce résultat est surprenant puisque le sous-bassin 7 est celui qui comporte de la végétation permanente, il devrait donc avoir une évolution d'indice plus basse et plus homogène au cours de l'année. En effet, la végétation permanente ne devrait pas montrer une grande différence de texture au cours de l'année, elle ne présente pas véritablement de « croissance » en période de pluies. On suppose donc que sa variance devrait être plus homogène qu'en zone de cultures.

De plus, la texture des différents bassins semble réagir de la même manière :

- une diminution de la variance et une homogénéisation des états de surface jusqu'au mois de mars, mois le plus sec.

- Une augmentation de la variance ensuite, pendant la croissance de la végétation, jusqu'à atteindre une valeur seuil.

Par ailleurs, en utilisant le découpage par paysage développé précédemment, et en se basant sur la cartographie d'occupation du sol proposé par le GLC 2000 (cf. Partie 1), la Figure 35 et la Figure 36 montrent les résultats obtenus en 2001 et 2006 en ne conservant que les images sans nuages.

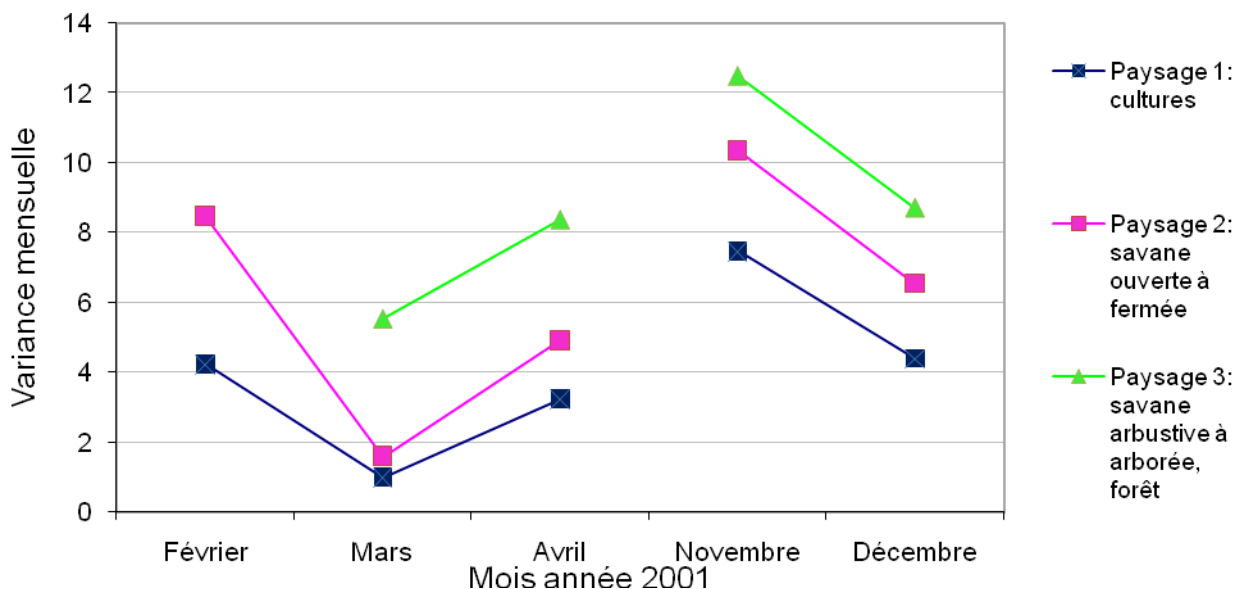


Figure 35 : Evolution de l'indice de variance par paysage au cours de l'année 2001

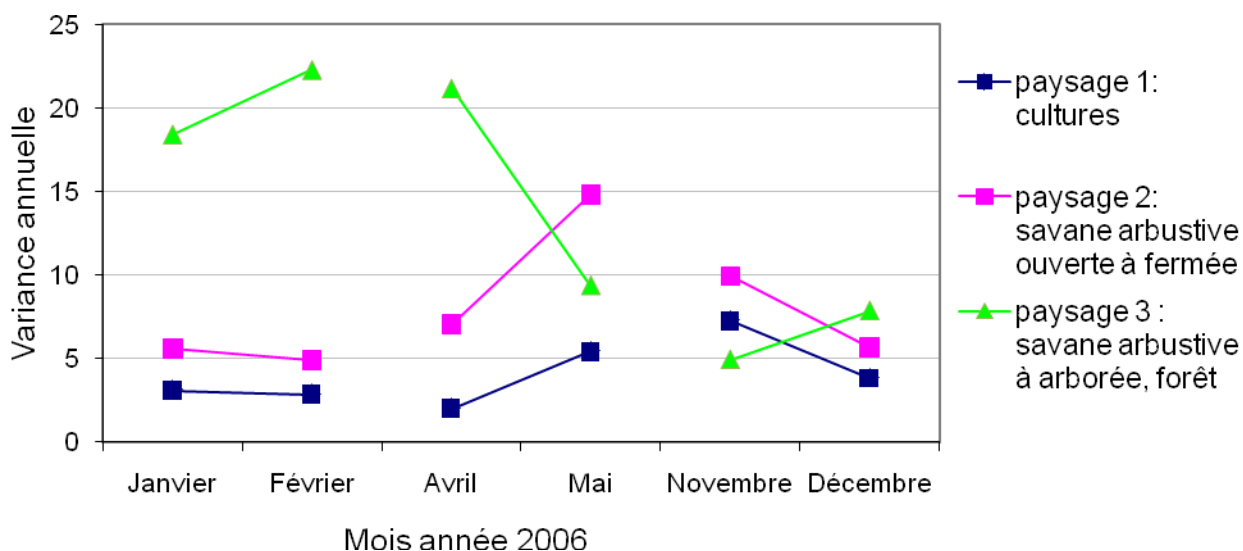


Figure 36 : Evolution de l'indice de variance par paysage au cours de l'année 2006

Ici encore, les différences entre chaque paysage sont difficiles à dégager. En 2001, la variance au sein du paysage « savane arbustive/forêt » semble une nouvelle fois plus élevée que celle de cultures ou de savanes.

La variance des paysages 1 et 2 présente les mêmes variations au cours de l'année 2001 et de l'année 2006 : elle varie entre 0 et 10 pour l'année 2001 et 0 et 15 pour l'année 2006. Cependant, pour le paysage 3, les variations apparaissent beaucoup

plus importantes : par exemple, la variance est trois fois plus grande en février 2006 qu'en décembre 2006.

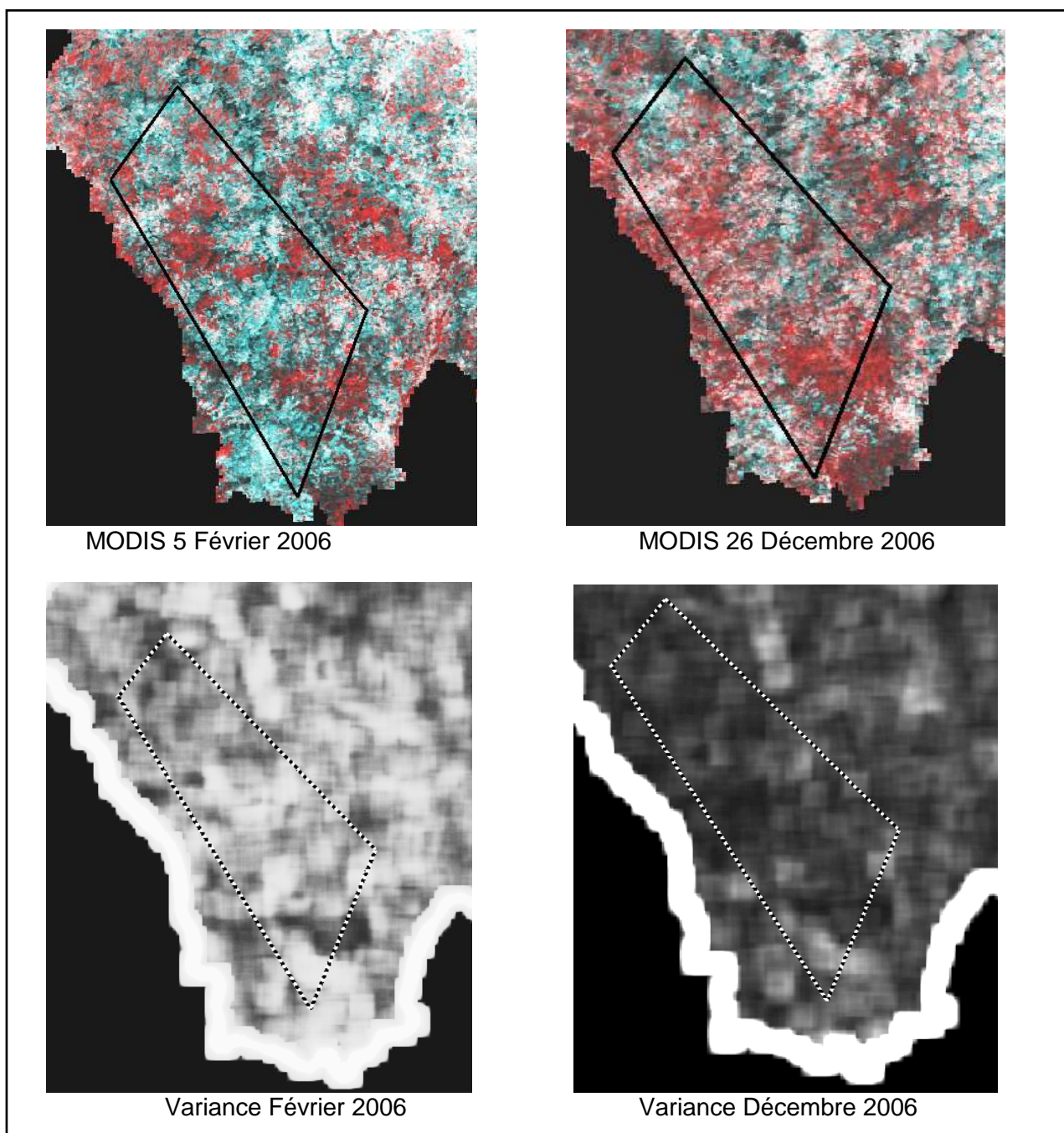


Figure 37 : Composition colorée (PIR, R, R) et image de variance pour le paysage 3 : 5 février 2006 et 26 décembre 2006

En observant les images et indices à l'œil nu (Figure 37) pour le paysage 3, l'image de décembre apparaît en effet plus homogène, après la pousse de la végétation, et le début de la période sèche. En février, il est par contre difficile de connaître les causes de cette hétérogénéité. Cette variance peut à la fois être due à l'homme (techniques de brûlis, coupe des arbres par exemple) et au mélange naturel de la végétation (stades phénologiques différents entre groupements végétaux, zones de cultures avec moins de résidus végétaux qu'en décembre...). Nos polygones apparaissent ici trop grands pour évaluer avec précision une texture. Le polygone « paysage 3 » comporte un mélange de différents paysages.

4.3. Analyse de l'évolution de l'OS ? Bilans et perspectives

Les deux approches testées dans cette étude (approche pluies-NDVI et approche texturale) ont été menées dans le but de développer une méthode permettant de suivre l'évolution de l'occupation du sol du Bani de 1982 à 2006. Elles ont été menées en parallèle, et sont basées sur deux hypothèses que nous pouvons rappeler :

- il existe une relation unique entre pluviométrie et type de couvert végétal, détectable à travers l'efficacité de la pluie; ainsi tout changement d'occupation du sol se traduira par une modification de la relation pluie-NDVI ;
- l'occupation du sol peut être décrite par un type de paysage ; tout changement d'occupation du sol peut être détecté par une modification de l'indice de texture des images.

Dans quelles mesures ces deux méthodes peuvent-elles être utilisées pour le suivi de l'occupation du sol du Bani de 1982 à 2006 ?

4.3.1. Relations Pluies/NDVI

Les résultats de cette étude suggèrent qu'il est possible de : i) définir une relation pluies-NDVI pour un sous-bassin versant et ; ii) dégager des tendances en terme d'efficacité pluviométrique normalisée sur le bassin du Bani entre 1982 et 2006. Ces résultats globaux ont pu être dégagés sur des images à basse résolution.

Nous avons tout d'abord mis en évidence une légère augmentation du NDVI annuel au cours de la période 1982-2006. Cette augmentation se voit un peu plus importante pour les sous-bassins du Sud que ceux du Nord. Elle peut être due à la fois aux pluies et à l'homme (changements d'occupation du sol). Pour s'affranchir de l'effet « pluie » et détecter des changements d'occupation du sol, il nous a semblé judicieux d'utiliser l'efficacité pluviométrique normalisée des pluies. Les résultats montrent qu'elle est en légère augmentation sur tous les sous-bassins versants, excepté le sous-bassin 6, situé au sud du bassin du Bani, essentiellement composé de savanes arborées et de forêts. Nos résultats concordent avec ceux de Prince *et al.* (1998) qui montrent que le CEP moyen est en augmentation au Sahel pour les zones de plus de 300mm de pluies annuelles. Cette augmentation peut s'expliquer, selon Prince *et al.* (1998), par une augmentation de l'infiltration, un usage plus important de fertilisants, ou un changement d'occupation du sol, comme une zone forestière remplacée par des cultures. La connaissance du terrain nous permet d'avancer que la raison principale pour laquelle l'efficacité pluviométrique du Bani augmente légèrement est l'augmentation de la proportion des cultures sur le bassin. En effet, comme nous l'avons évoqué précédemment, une zone de cultures valorise mieux la pluie qu'une zone forestière. Elle rentabilise cette pluie par sa croissance considérable lors de la saison humide. Au contraire, la réflectance d'une forêt ne devrait pas présenter une grande différence entre la saison humide et la saison sèche.

Pour le sous-bassin 6, cette efficacité apparaît en légère régression sur les 25 années étudiées. Ce sous-bassin accueille le site expérimental de Madina-Diassa. D'après les observations terrain menées sur ce site, cette zone présente une anthropisation très faible, et donc une évolution de la zone de cultures très faible. Le phénomène prépondérant sur cette zone est un phénomène de rotation: les zones de cultures se déplacent au fil du temps, mais n'augmentent pas en surface au sol (D. Ruelland, communication personnelle). Ce sous-bassin 6 est une aire qui présente une régénération rapide, où les techniques de brûlis sont largement utilisées. Cette

recolonisation rapide de la végétation permet aux habitants de déplacer leurs zones de culture.

En ce qui concerne le découpage par paysage, nos résultats montrent que l'efficacité du paysage 1, composé à plus de 50% de cultures, est en augmentation. On peut en déduire que la surface de cultures à l'intérieur de ce polygone est en augmentation, ce qui rejoint les résultats obtenus sur les sites expérimentaux du Bani (Ruelland *et al.*, *subm.*).

L'analyse des relations pluies-NDVI au pas de temps annuel se présente donc comme une méthode relativement bien adaptée à la détection des changements d'occupation du sol sur un bassin versant soudano-sahélien tel que le Bani. L'utilisation du coefficient d'efficacité pluviométrique est plus complexe qu'une simple analyse d'NDVI annuel, cependant, elle a l'avantage de dissocier les facteurs de variations du NDVI, la pluie et l'occupation du sol. Elle permet d'étudier la dynamique des états de surface sur le bassin, indépendamment des variations naturelles de la pluviométrie, ce qui corrobore plusieurs études rencontrées dans la littérature (Prince *et al.*, 1998; Diouf & Lambin, 2001 ; Lacaze *et al.*, 2003).

En ce qui concerne les efficacités mensuelles, nous avons pu modéliser les relations efficacité-pluies par type de paysage. Les relations sont différentes mais l'efficacité du paysage 3, à dominante forestière, apparaît plus élevée que l'efficacité à dominante culturale. Cette modélisation pourrait donc être faussée par la valeur de NDVI minimum, qui est plus importante pour la forêt que pour les cultures, et qui fausserait ensuite la valeur d'efficacité mensuelle.

Nous n'avons pas pu, dans le temps imparti, développer correctement cette méthode d'efficacité mensuelle. Il faudrait réitérer les calculs d'efficacité en essayant de la corriger du NDVI minimum. La normalisation par la pluie pourra ensuite être faite comme précédemment : on utilisera la modélisation de l'efficacité mensuelle en fonction de la pluie. Cette fonction nous servira de modèle pour pouvoir ensuite corriger l'évolution de l'efficacité mensuelle au cours du temps, et pouvoir suivre les changements d'amplitude de l'efficacité pluviométrique qui dépendront alors uniquement de l'occupation du sol. Pour suivre l'évolution globale au cours des 25 années étudiées, il serait possible de regrouper les résultats mensuels en différentes périodes (1982-1990, 1991-1999, 2000-2006) et de modéliser ces relations.

4.3.2. Texture

Les indicateurs de texture, bâtis dans un premier temps sur les synthèses bimensuelles, n'ont pas donné de résultats satisfaisants en raison de la très forte hétérogénéité des images induite par l'algorithme de synthèse.

Les résultats obtenus sur les images MODIS journalières ont montré qu'il est difficile de détecter des différences d'indice de texture entre paysages, et d'interpréter ces changements au cours du temps. La principale raison est la présence de nuages quasi-permanente dans le sud du bassin. Ces nuages ont un très fort impact sur la texture de l'image. L'étude de texture s'est faite sur respectivement 5 et 6 images pour les années 2001 et 2006, ce qui est très faible pour suivre une évolution d'indice au cours de l'année.

D'autre part, nos paysages ont été choisis de manière à pouvoir étendre notre résultat à l'ensemble du bassin. Nous avons ainsi choisi trois paysages d'un point de vue global : nos polygones ont été définis en terme de dominance (zone à dominante culturale, forestière...). Cependant, différents types de paysages et de motifs sont inclus dans ces polygones, et il a ainsi été plus difficile d'étudier une texture sur un mélange de paysages. Pour le paysage 3 (savanes arborées et forêts) en particulier, l'indice de variance est plus important que pour les autres paysages, et est également plus hétérogène au cours du temps. Ceci peut s'expliquer par l'échelle de travail choisie, avec pour le paysage 3, un polygone à dominante forestière, qui regroupait un mélange de savane arbustive, de savane arborée, de forêt, et certainement de quelques cultures. L'indice de variance rend compte de toutes ces entités, qu'elles soient minoritaires ou majoritaires, et ne permet donc pas de tirer de conclusions à un niveau global. Pour remédier à cette difficulté, il faudrait opérer à un changement d'échelle, relancer les traitements sur des polygones « paysages » plus petits, en ayant la certitude qu'ils ne comportent qu'un seul type d'occupation du sol.

Les résultats montrent que la texture évolue au cours de l'année et mettent en évidence des différences d'amplitudes entre chaque paysage. Les différences d'amplitudes de variance au sein d'un polygone pourraient à la fois être dues à la pression anthropique sur le milieu (déforestation, défrichement pour l'agriculture, pâturage, exploitation de bois) liée à la croissance démographique, et d'autre part à l'impact direct du climat (disparition de la végétation lors de périodes de sécheresse), à l'intérieur du polygone. Il faudrait alors trouver un moyen de s'affranchir de l'effet de la pluie, pour ne garder que l'effet du paysage lui-même sur la variance, et avoir un recul temporel plus important pour confirmer ces évolutions.

Ainsi, il apparaît pour l'instant difficile de conclure sur la pertinence de la méthode texturale utilisée dans cette étude, en raison de la faible disponibilité des images dépourvues de nuages d'une part, et de la faible profondeur temporelle disponible d'autre part (images MODIS journalières de 2000 à 2006 seulement).

Dans la littérature, nous avons trouvé de nombreux travaux concernant des analyses de texture à partir d'images à très haute résolution spatiale (Borne, 1994 ; Hauta-Kasari *et al.*, 1999 ; Lelong and Thong-Chane, 2003 ; Hu, 2005), mais aucune analyse à basse résolution. C'est une analyse complexe, longue à mettre en œuvre, et qui reste relativement intuitive dans la définition des paramètres. Il n'a pas été possible dans le temps imparti de développer correctement cette méthode texturale, mais en ayant accès à plus d'images, nous pensons qu'il est possible d'évaluer un changement d'états de surface par cette méthode.

Conclusion

Cette étude a été menée dans le but de caractériser la dynamique des états de surface. Cette caractérisation a reposé sur le développement d'une méthode de détection des changements d'occupation du sol à partir d'images basse à moyenne résolution à l'échelle d'un grand bassin versant soudano-sahélien (130 000 km²).

Pour cela, nous avons testé deux approches originales sur des jeux de données satellitaires acquis par des capteurs à large champ: une analyse de l'indice de végétation NDVI (1982-2006, NOAA-AVHRR à 8 km de résolution) comparée aux données de pluies disponibles sur le bassin, et une analyse d'indices de texture (2001-2006, TERRA-MODIS à 250 m). L'étude permet de conclure que l'analyse des relations pluies-NDVI est adaptée à la détection des changements d'occupation du sol à l'échelle régionale. Elle révèle sur la majorité du bassin une légère augmentation du coefficient d'efficacité pluviométrique normalisé, sur la période 1982-2006, qui se justifie vraisemblablement par une augmentation de la proportion des cultures sur le bassin. Concernant l'approche texturale, les résultats sont plus difficiles à interpréter en raison de la difficulté à obtenir des images journalières dégagées dans le sud du bassin. Les analyses de texture devront être répétées sur un plus grand nombre d'images sans nuage, et avec un recul temporel plus important.

Il est important de caractériser la dynamique de ces états de surface puisqu'elle conditionne pour partie le ruissellement et l'infiltration, qui sont généralement paramétrés dans de nombreux modèles hydrologiques. Prosaïquement, il s'agit de quantifier le potentiel de ruissellement, chaque état de surface étant associé à un coefficient de ruissellement. La méthodologie développée dans cette étude suggère qu'un état de surface est caractérisé par une efficacité pluviométrique normalisée. Il serait donc possible d'allier une efficacité pluviométrique à un indice de production de ruissellement (coefficient de ruissellement), qui est ensuite intégrable comme donnée d'entrée ou comme paramètre dans des modèles hydrologiques.

Par le forçage ou l'ajustement à des données d'occupation du sol, on espère améliorer les performances des modèles hydrologiques, utilisés pour simuler l'évolution des ressources en eau, ce qui permettra des prévisions plus robustes à partir des scénarii climatiques issus des modèles sur le changement climatique global.

Bibliographie

- Anyamba, A., and Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments* 63, 596-614.
- Baraldi, A., and Parmiggiani, F. (1995). Region-growing algorithm to detect segments featuring low contrast in multispectral images. In *"Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering"* (J. Desachy, ed.), Vol. 2579, pp. 234-247. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Paris, Fr.
- Borne F. (1994). New Features for Texture Analysis, "Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation" *International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'94*. Proceedings, CalTech, Pasadena, California, Etats-Unis.
- Budde, M. E., Tappan, G., Rowland, J., Lewis, J., and Tieszen, L. L. (2004). Assessing land cover performance in Senegal, West Africa using 1-km integrated NDVI and local variance analysis. *Journal of Arid Environments* 59, 481-498.
- Casenave, A. et Valentin, C. (1989). *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Editions de l'Orstom, Paris. 229 pp.
- Dessay N., et al. (2004) Comparative study of 1982-1983 and 1997-1998 El Niño events over different types of vegetation in South America, *International Journal of Remote Sensing*, 25, p. 4063-4077.
- Dessay, N., (2006). *Dynamique de la végétation et climat : étude par télédétection de cinq biomes brésiliens forêt ombrophile dense et ouverte, cerrados, caatinga et campanha gaúcha*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris X, 362 pp.
- Diouf, A., and Lambin, E. F. (2001). Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: Remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. *Journal of Arid Environments* 48, 129-148.
- Eklundh, L., and Olsson, L. (2003). Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters* 30, 13-1.
- Fritz, S. et al. (2003). Harmonisation, mosaicing and production of the Global Land Cover 2000 database (Beta Version). Luxembourg: *Office for Official Publications of the European Communities*, EUR 20849 EN, 41 pp., ISBN 92-894-6332-5.
- Gray Jr, T. I., and Tapley, B. D. (1985). Vegetation health: Nature's climate monitor. *Advances in Space Research* 5, 371-377.
- Haralick, R. M. (1979). *Statistical and structural approaches to texture*. Proc IEEE 67, 786-804.
- Hauta-Kasari, M. et al. (1999). *Multi-spectral texture segmentation based on the spectral cooccurrence matrix*. PAA(2), No. 4, pp. 275-284.
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7, 1417-1434.
- Holm, A. M., Watson, I. W., Loneragan, W. A., and Adams, M. A. (2003). Loss of patch-scale heterogeneity on primary productivity and rainfall-use efficiency in Western Australia. *Basic and Applied Ecology* 4, 569-578.
- Hountondji, Y. C., Sokpon, N., and Ozer, P. (2006). Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the

- monitoring of desertification. *International Journal of Remote Sensing* 27, 871-884.
- Hu, X.Y., Tao, C.V., Prenzel, B. (2005). *Automatic segmentation of high-resolution satellite imagery by integrating texture, intensity, and color features*. PhEngRS(71), No. 12, pp. 1399-1406.
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N., and Tucker, C. J. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 6, 1271-1318.
- Kaufman, Y. J. (1987). *Atmospheric effect on spectral signature - measurements*. *Advances in Space Research* 7, 203-206.
- Kwarteng, A. Y., and Chavez Jr, P. S. (1998). *Change detection study of Kuwait City and environs using multi-temporal Landsat Thematic Mapper data*. *International Journal of Remote Sensing* 19, 1651-1662.
- Lacaze, B., Aït-Bachir, S. and Sommer, S. (2003). Analyse diachronique de l'efficacité des pluies pour la production végétale dans le bassin méditerranéen de 1982 à 1996. *Téledétection*, 3 (2-3-6), 165-174.
- Lamb, P. J. (1982). Persistence of Subsaharan drought. *Nature* 299, 46-48.
- Le Houérou, H. N. (1984). Rain-use efficiency : a unifying concept in arid land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7, 1-35.
- Lelong C., Thong-Chane A. (2003). Learning from earth's shapes and colors . In : *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, Toulouse, France, 21-25 July 2003. Piscataway : IEEE, p. 1007-1009.
- Lelong, C. (2007). Extraction de l'information en télédétection : L'analyse de texture. Cours mastère SILAT, Maison de la Télédétection de Montpellier, France.
- Levavasseur, F. (2008). Suivi de l'occupation du sol sur 40 ans à partir d'images satellitaires sur deux sites-témoin au Mali. CNRS, IRD, Sup Agro' Montpellier, rapport de stage d'année d'alternance sous la direction de Denis Ruelland, 62 pp.
- Li, J., Lewis, J., Rowland, J., Tappan, G., and Tieszen, L. L. (2004). Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments* 59, 463-480.
- Lloyd, D. (1989). A phenological description of Iberian vegetation using short wave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing* 10, 827-833.
- Los, S. O. (1998). Estimation of the ratio of sensor degradation between NOAA AVHRR channels 1 and 2 from monthly NDVI composites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36, 206-213.
- Los, S. O. *et al.* (2000). A global 9-yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology* 1, 183-199.
- Mahe, G. (2006). The impacts of land-use/land-cover change and climate variability on the hydrology of the Sahel. In "*IAHS-AISH Publication*", pp. 679-684.
- Malo, A. R., and Nicholson, S. E. (1990). A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of Arid Environments* 19, 1-24.
- Mayaux, P., Bartholome, E., Fritz, S., and Belward, A. (2004). A new land-cover map of Africa for the year 2000. *Journal of Biogeography* 31, 861-877.
- Milich, L., and Weiss, E. (2000). GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV)

- images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing* 21, 235-260.
- Nicholson, S. E. (1979). Revised rainfall series for the West African subtropics. *Monthly Weather Review* 107, 620-623.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P., and Mahe, G. (1998). Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. *IAHS-AISH Publication*, 189-197.
- Olsson, L., Eklundh, L., and Ardo, J. (2005). A recent greening of the Sahel - Trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments* 63, 556-566.
- Prasad, T. S., and Gupta, R. K. (1998). Texture based classification of multirate SAR images - a case study. *Geocarto International* 13, 53-62.
- Prince, S. D., Brown De Colstoun, E., and Kravitz, L. L. (1998). Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology* 4, 359-374.
- Richard, Y., and Pocard, I. (1998). A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing* 19, 2907-2920.
- Roberts, D.A, Batista, G.T., Pereira J.L.G, Waller, E.K., Nelson, B.W. (1998). Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: applications in eastern Amazonia. In Lunetta, R.S., Elvidge, C.F. Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications. *Ann Arbor Press*, Michigan, USA, 308.
- Rosborough, G. W., Baldwin, D. G., and Emery, W. J. (1994). Precise AVHRR image navigation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32, 644-657.
- Rouse, I. (1974). The explanation of culture change. *Science* 185, 343-344.
- Ruelland, D., Dezetter, A., Puech, C., Ardoin-Bardin, S. (2008). Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 29(12), 3533-3551.
- Ruelland, D., Tribotté, A., Puech, C., Dieulin, C. (subm.). Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years in Sahel from aerial photographs and satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, subm.
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Billen, G., Servat, E. Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several modes of rainfall interpolation on a large basin in West Africa. *Journal of Hydrology* (in press).
- Sali, E., and Wolfson, H. (1992). Texture classification in aerial photographs and satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 13, 3395-3408.
- Tanaka, M., Weare, B. C., Navato, A. R., and Newell, R. E. (1975). Recent African rainfall patterns. *Nature* 255, 201-203.
- Tappan, G., and McGahuey, M. (2007). Tracking environmental dynamics and agricultural intensification in southern Mali. *Agricultural Systems* 94, 38-51.
- Tappan, G. G., Hadj, A., Wood, E. C., and Lietzow, R. W. (2000). Use of Argon, Corona, and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in west-central Senegal. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66, 727-735.
- Tottrup, C., and Rasmussen, M. S. (2004). Mapping long-term changes in savannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing

- data. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103, 545-560.
- Townshend, J. R. G. (1994). The 1 km resolution global data set: needs of the International Geosphere Biosphere Programme. *International Journal of Remote Sensing* 15, 3417-3441.
- Townshend, J. R. G. (1994). Global data sets for land applications for the Advanced Very High Resolution Radiometer: an introduction. *International Journal of Remote Sensing* 15, 3319-3332.
- Townshend, J. R. G., Goff, T. E., and Tucker, C. J. (1985). Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* GE-23, 888-895.
- Townshend, J. R. G., and Justice, C. O. (1986). Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing* 7, 1435-1445.
- Townshend, J. R. G., and Justice, C. O. (1990). The spatial variation of vegetation changes at very coarse scales. *International Journal of Remote Sensing* 11, 149-157.
- Tucker, C. J., Newcomb, W. W., Los, S. O., and Prince, S. D. (1991). Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing* 12, 1133-1135.
- Tucker, C. J., and Nicholson, S. E. (1999). Variations in the size of the Sahara Desert from 1980 to 1997. *Ambio* 28, 587-591.
- Vancutsem, C. et al. (2004). *Performance assessment of the mean compositing strategy for coarse spatial resolution data*. Antwerp. Disponible sur : <http://www.vgt.vito.be/vgtapen/pages/presentations/2503_Vancutsem_MC.pdf>. (le 07 septembre 2008).
- Vermote, E., and Kaufman, Y. J. (1995). Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views. *International Journal of Remote Sensing* 16, 2317-2340.
- Vermote, E. F., El Saleous, N., Justice, C. O., Kaufman, Y. J. (1997). Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 102, 17131-17141.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Classifications ENVI et ECOGNITION.

ANNEXE 2 : Architecture de batch d'extraction de NDVI sur les images NOAA-AVHRR.

ANNEXE 3 : Tests de fenêtres pour l'indice de texture sous ENVI : indice de contraste, image MODIS du 5 février 2001.

ANNEXE 4 : Indices de variance 2001 et 2006, toutes dates.

ANNEXE 5 : Commandes sous R.

ANNEXE 6 : Relations NDVI-pluies, pas de temps mensuel, sous bassin 7.

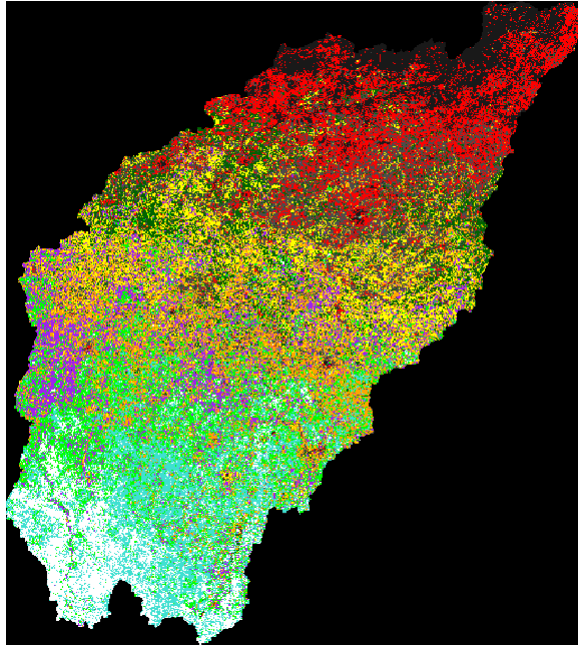
ANNEXE 7: Relations Efficience-Pluies, 2 méthodes de régression linéaire.

ANNEXE 8 : Efficience annuelle corrigée de la pluie par sous-bassin.

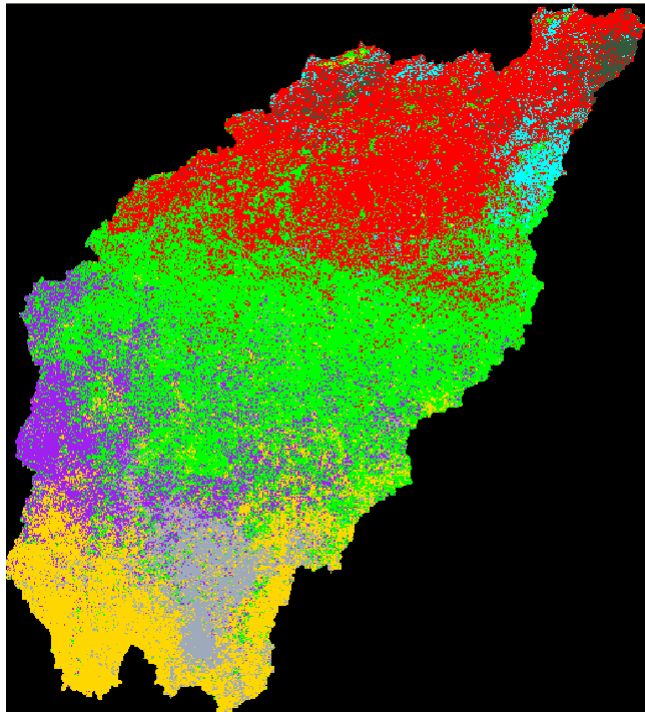
ANNEXE 9 : Changement de résolution : comparaison NOAA-SPOT.

ANNEXE 1 : Classifications ENVI et ECOGNITION

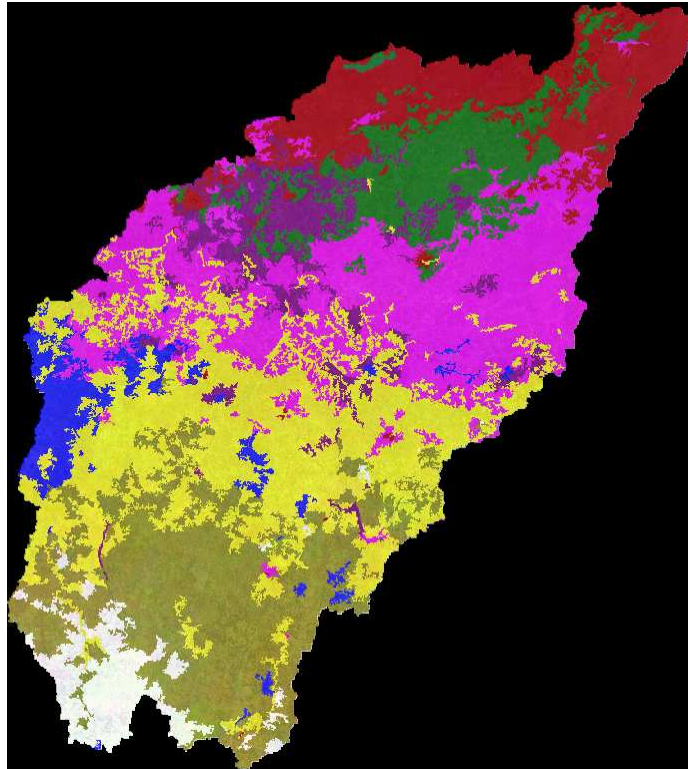
- 1) Classification non supervisée ENVI, 10 classes – à partir de 21 synthèses MODIS de 2002, canal EVI



- 2) Classification supervisée ENVI - à partir de 21 synthèses MODIS de 2002, canal EVI – 7 AOI



- 3) Classification supervisée Définiens Developer -à partir de 21 synthèses MODIS de 2002, canal EVI – 6 AOI

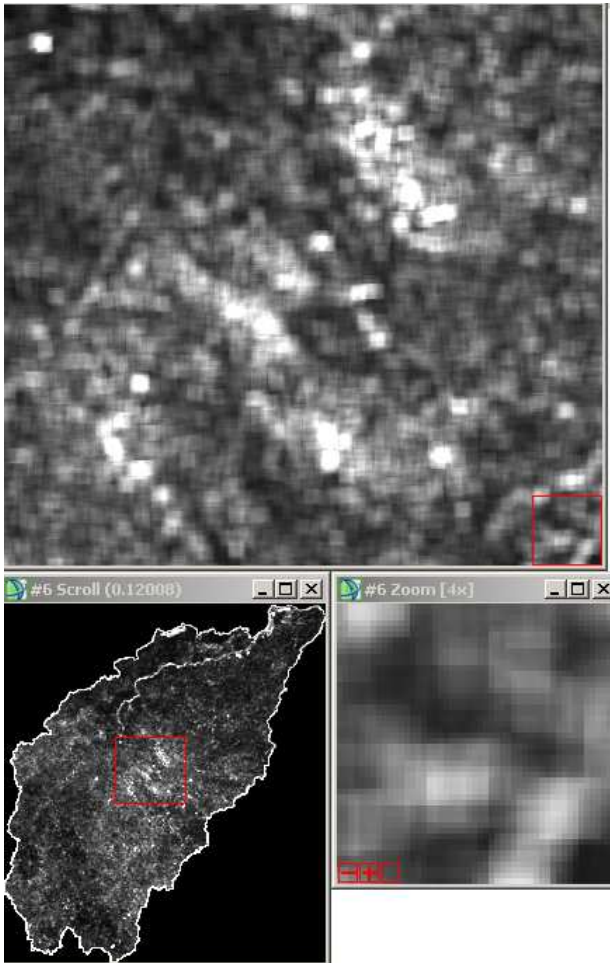


ANNEXE 2 : Architecture de batch d'extraction de NDVI sur les images NOAA-AVHRR

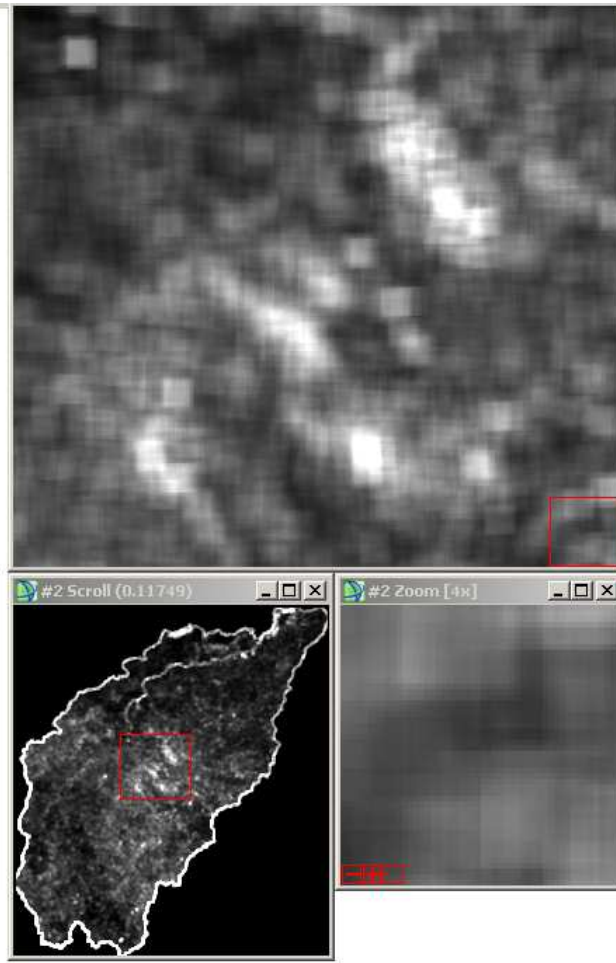
```
modeler -nq -meter -state $IMAGINE_HOME/etc/models/covzonal.pmdl Intersection  
"f:/bani/modis/shape bani/bani_sofara_8bv_albersconical.shp" float "f:/bani/noaa  
corrigees par nadine/ndvi_month_82_06_erdas.img" 'float table maxt attribute incov ::  
"Janvier1982";' 'maxt = zonal max (incov, inrast (1), ignore 0);' "None"
```

Cette ligne a été recopiée 300 fois, en incrémentant la valeur du inrast de 1 à 300.
On intègre ensuite ce batch dans le Zonal Attributes sous Erdas.

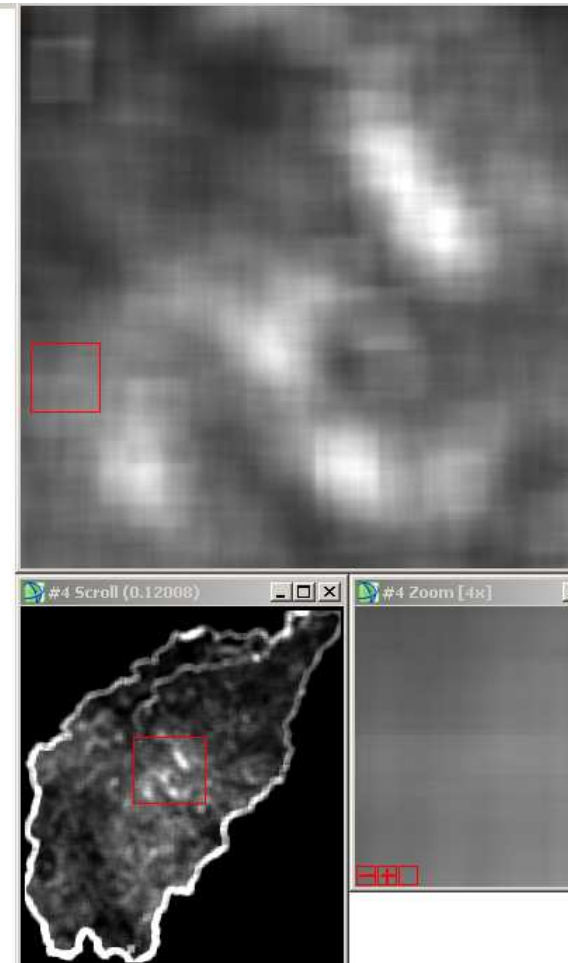
**ANNEXE 3 : Tests de fenêtres pour l'indice de texture sous ENVI :
indice de contraste, image MODIS du 5 février 2001**



11x11



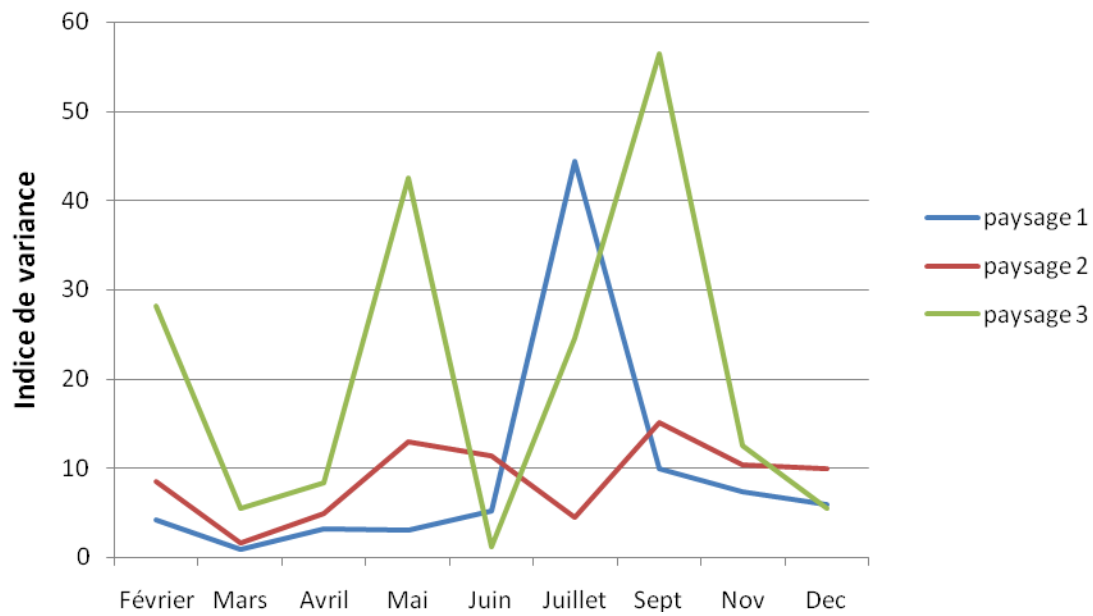
21x21



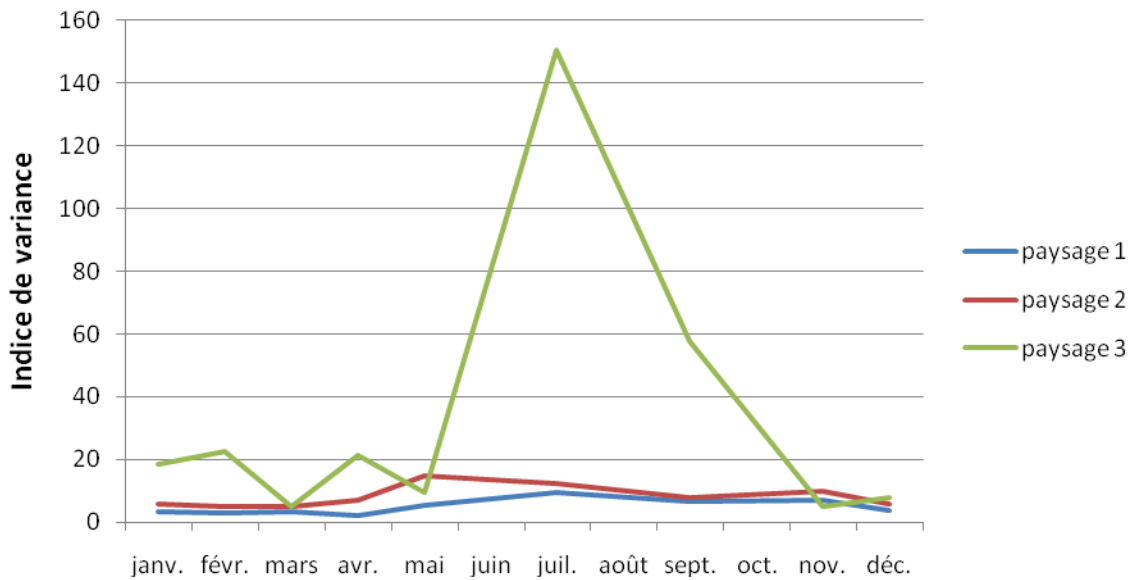
45x45

ANNEXE 4 : Indices de variance 2001 et 2006, toutes dates

Indice de variance 2001 par paysage



Indice de variance 2006 par paysage



ANNEXE 5 : Commandes sous R

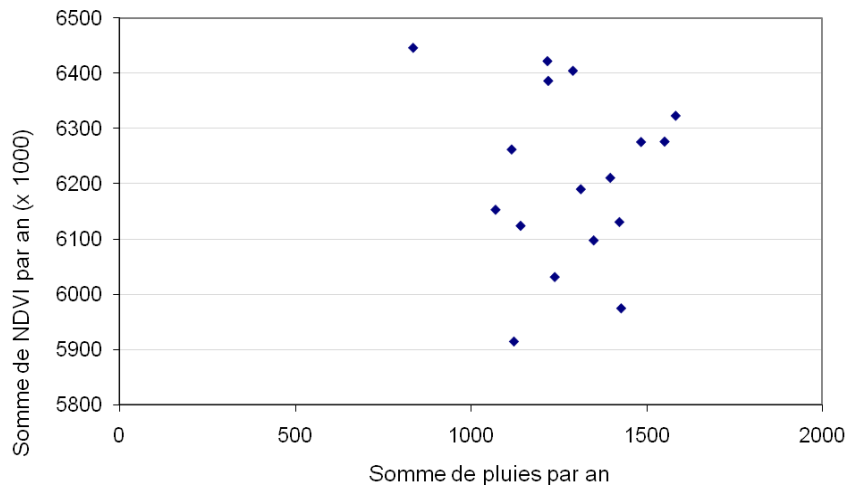
- Régression linéaire NDVI en fonction de la pluie, avec décalage d'un mois

```
> bv1<-read.table(file("E:/Bani/R/BV1.txt"),header=TRUE)
> dim(bv1)
> for (i in 1:300)
> bv1$NDVI[i]<-bv1$NDVI[i+1]
> bv1_decal1<-bv1[1:299,]
> bv1_decal1
> plot(bv1_decal1$Pluvio,bv1_decal1$NDVI)
> cor(bv1_decal1$Pluvio,bv1_decal1$NDVI)
> reg<-lm(Pluvio~NDVI,data=bv1_decal1)
> summary(reg)
> abline(reg,col=2)
```

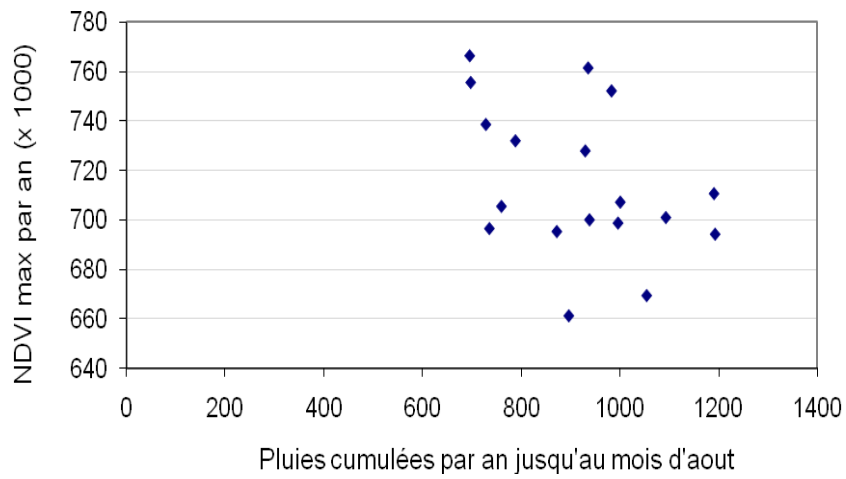
- Modélisation NDVI en fonction de la pluie, avec décalage, mois 3 à 10

```
> x<-bv1_decal1$Pluvio
> y<-bv1_decal1$NDVI
> plot(x,y)
> essai<-nls(y~a*(1-b*exp(-c*x)),start=list(a=800,b=1,c=0.005),trace=TRUE)
> lines(sort(x),sort(predict(essai)),col="red")
> summary(essai)
```


ANNEXE 6 : Relations NDVI-pluies, pas de temps mensuel, sous bassin 7



NDVI annuel en fonction des pluies annuelles, sous-bassin 7

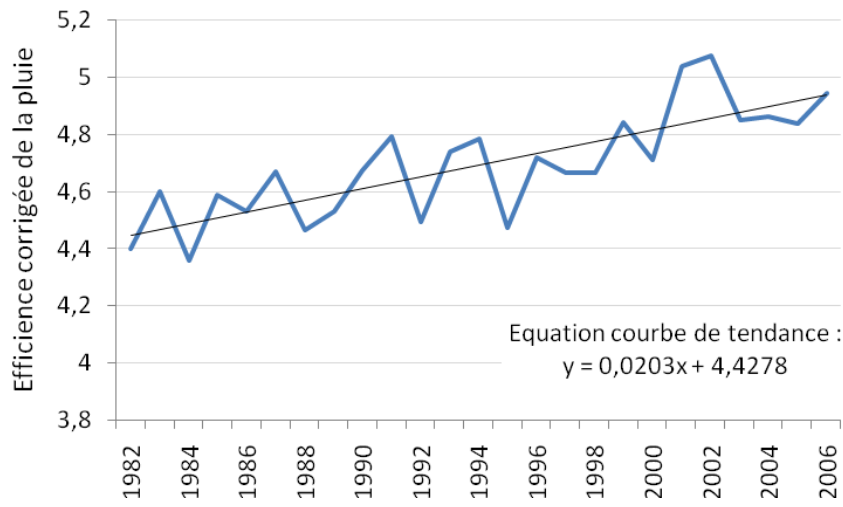


NDVI maximum en fonction des pluies de mars à août, sous-bassin 7

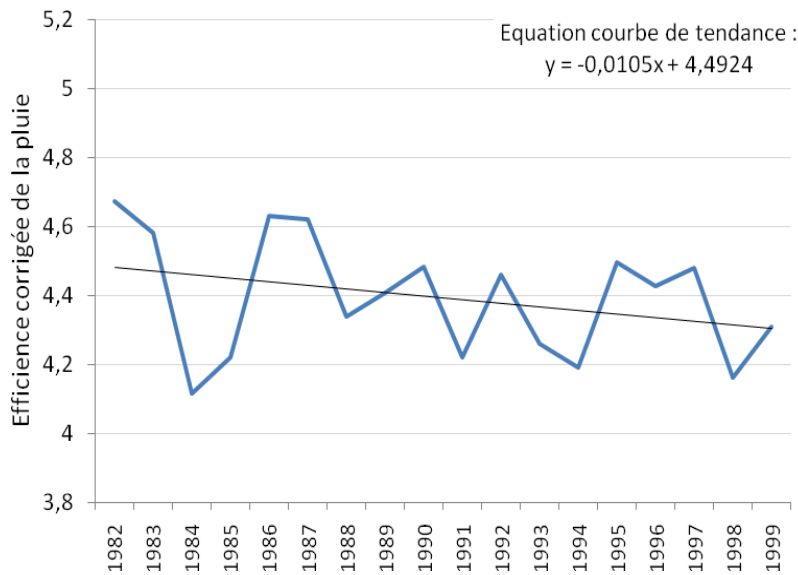
ANNEXE 7: Relations Efficience-Pluies, 2 méthodes de régression linéaire

	Méthode 1		Méthode 2	
	Droite de régression	R ²	Droite de régression	R ²
Paysage 1	$y = -0,002x + 2,1528$	R ² = 0,856	$y = -0,0082x + 11,744$	R² = 0,8554
Paysage 2	$y = -0,0015x + 1,996$	R ² = 0,8176	$y = -0,0062x + 11,276$	R² = 0,9188
Paysage 3	$y = -0,0012x + 1,9097$	R ² = 0,9137	$y = -0,0045x + 11,168$	R² = 0,9523

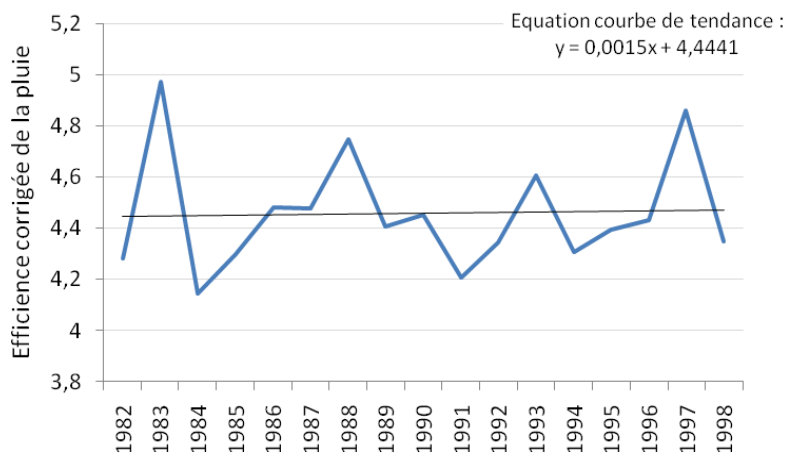
ANNEXE 8 : Efficience annuelle corrigée de la pluie par sous-bassin



Sous-bassin 3



Sous-bassin 6



Sous-bassin 7

Annexe 9 : Changement de résolution : comparaison NOAA-SPOT

