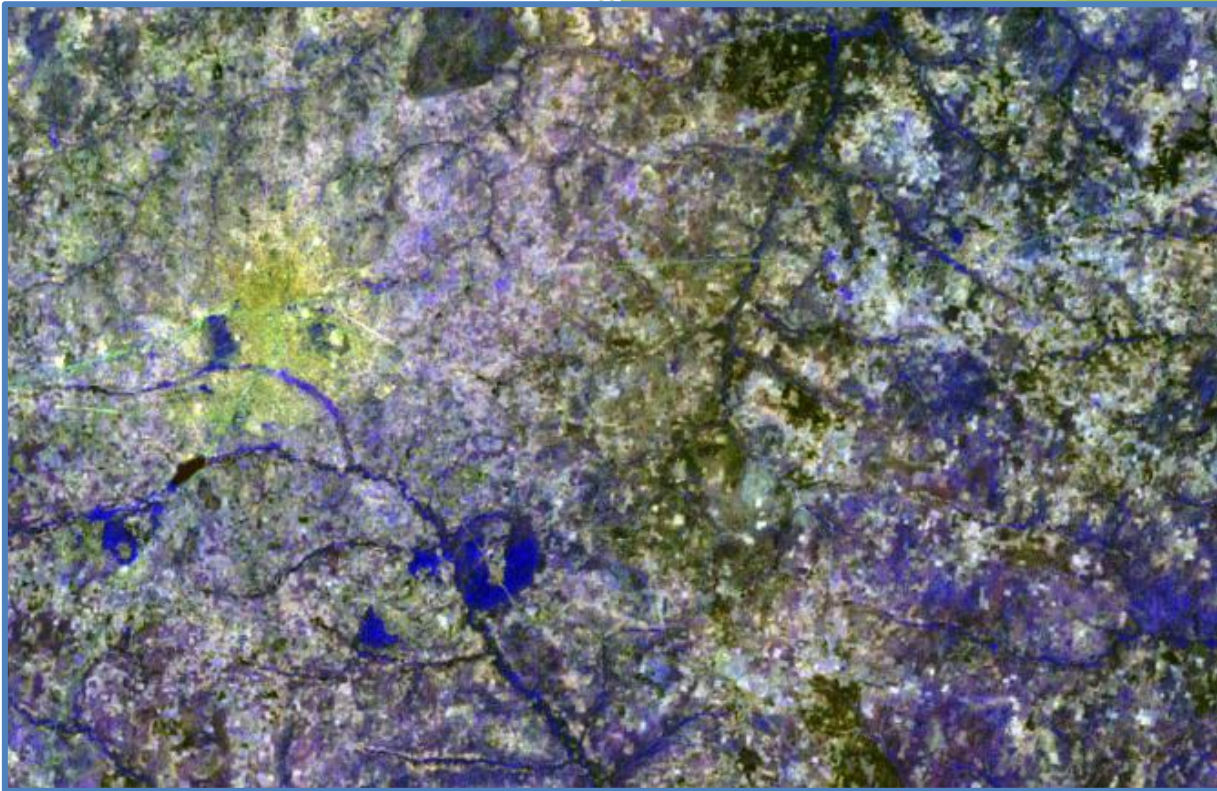


# 2012

Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS– Cas d'étude du communal de Djougou



escape



Leroux Louise

Hydrosciences Montpellier, ANR ESCAPE

## Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2. Données et méthodes</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Présentation du site d'étude</b>	<b>5</b>
2.1.1. Présentation générale du bassin supérieur de l'Ouémé	5
2.1.2. Présentation du communal de Djougou	6
<b>2.2. Données</b>	<b>6</b>
2.2.1. Données satellitaires	6
2.2.1.1. Les images Landsat	6
2.2.1.2. L'image MODIS	7
2.2.2. Les données photographiques	8
2.2.3. Les images Google Earth©	9
<b>2.3. Méthodes</b>	<b>9</b>
2.3.1. Mission terrain	9
2.3.1.1. La prise de points terrain	9
2.3.1.2. Définition des classes d'occupation du sol	9
2.3.1.3. Traitements des points GPS	12
2.3.2. Cartographie diachronique de l'occupation du sol sur la commune de Djougou	13
2.3.2.1. Reconnaissance spectrale des classes d'occupation du sol à partir de l'image de 2010	13
2.3.2.2. Méthodologie générale : Classification supervisée des images satellites	14
2.3.2.3. Classification supervisée de l'image de 2010	16
2.3.2.4. Classification supervisée de l'image de 2000	18
2.3.2.5. Classification supervisée de l'image de 1986	18
2.3.2.6. Classification supervisée de l'image de 1973	19
2.3.3. Cartographie de l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé	19
2.3.3.1. Classification supervisée de l'image de 2000	19
2.3.3.2. Classification supervisée de l'image de 1986	20
2.3.3.3. Classification supervisée de l'image de 1973	20
2.3.3.4. Classification supervisée de l'image de 2012	20
<b>3. Résultats</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Cartographie diachronique de l'occupation du sol</b>	<b>21</b>
3.1.1. Cartographie de l'occupation du sol autour de Bétérou	21
3.1.2. Cartographie diachronique de l'occupation du sol sur la commune de Djougou (1973-2000)	22
<b>3.2. Changements d'occupation du sol entre 1973 et 2012</b>	<b>24</b>
3.2.1. Autour de la commune de Djougou (1973-2000)	24
3.2.2. Au sein du bassin supérieur de l'Ouémé (1973-2012)	25
<b>4. Analyse et interprétation</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Cartographie des changements</b>	<b>27</b>
4.1.1. Matrice des changements paysagers entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou	27

4.1.2.	Matrice des changements paysagers entre 1973 et 2012 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé _____	28
4.1.3.	Cartographie dynamique des changements entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou _____	30
4.1.4.	Cartographie dynamique des changements entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé _____	32
<b>4.2.</b>	<b>Analyse des trajectoires d'évolution entre 1973 et 2000 autour de la commune de Djougou _____</b>	<b>34</b>
4.2.1.	Analyse en Composantes Principales entre 1973 et 2000 autour de la commune de Djougou _____	34
4.2.2.	Les dynamiques de l'occupation du sol sur la commune de Djougou entre 1973 et 2000 : l'influence de la ville de Djougou et du réseau de routes _____	36
4.2.2.1.	<i>Création des entités villes et réseau de routes _____</i>	36
4.2.2.2.	<i>La dynamique de l'occupation du sol en fonction de l'éloignement à la ville de Djougou _____</i>	37
4.2.2.3.	<i>La dynamique de l'occupation du sol en fonction de l'éloignement au réseau de routes _____</i>	39
<b>5.</b>	<b>Discussion et conclusion _____</b>	<b>41</b>
	<b>Bibliographie _____</b>	<b>43</b>
	<b>Liste des Figures _____</b>	<b>45</b>
	<b>Liste des Graphiques _____</b>	<b>45</b>
	<b>Liste des Tableaux _____</b>	<b>46</b>
	<b>Annexe _____</b>	<b>47</b>

# 1. Introduction

Comme ce qui est observé à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, une forte modification des couverts végétaux est en cours au Bénin (WEZEL *et al.*, date ?). En effet, la variabilité climatique de ces dernières décennies est un des facteurs déterminant de ces transformations. Elle se traduit par une diminution des précipitations et une plus grande occurrence des périodes de sécheresses. Ce phénomène a par conséquent une incidence non négligeable sur les ressources naturelles (KOUAME *et al.*, 2007). Par ailleurs, dans le même temps, les pays d'Afrique de l'Ouest connaissent une forte croissance démographique. Cette augmentation de la population se traduit d'une part par une extension des terres cultivables et d'autre part par une extension des surfaces urbanisées. Par conséquent, une accentuation de la dégradation de la végétation naturelle est observée (WEZEL *et al.*, date ?). Ainsi, si la végétation est particulièrement sensible aux variations climatiques, elle l'est également aux dynamiques de la composante anthropique (notamment les activités liées à l'agriculture, au déboisement et à l'urbanisation croissante, BIGOT *et al.*, 2005).

A travers ces observations d'ordre environnemental, ce sont également des problèmes d'ordre économique et sociale qui sont sous-jacents. En effet, en raison de cette variabilité climatique et de la croissance démographique, l'Afrique présente une sécurité alimentaire précaire. Ainsi, le programme Escape (Environmental and Social Changes in Africa : Past, present and futurE), dans lequel s'insère ce travail, vise d'une part à caractériser la vulnérabilité des sociétés face aux changements environnementaux et climatiques et d'autre part, de déterminer des moyens d'adaptation des populations en vue d'une meilleure sécurité alimentaire. Pour ce faire, une connaissance approfondie de l'occupation du sol et de ces modifications au cours du temps est nécessaire pour une meilleure compréhension des processus.

Dans ce cadre, le présent travail vise à faire une caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé au Bénin et à quantifier l'impact des pressions anthropiques sur le paysage. L'Ouémé est le plus grand cours d'eau du Bénin (TOSSA ET TONOUHEWA, 2009), et le bassin supérieur de ce cours d'eau est situé dans le département de la Donga. Il s'étend entre 9° et 10° N et 1.5° et 2.5°E, couvrant ainsi une superficie de près de 14 000 km<sup>2</sup> (VARADO, 2004 ; BIGOT *et al.*, 2005 – Figure 1). Le cas particulier de la commune de Djougou est étudié. Cette dernière se situe au Nord-Ouest du Bénin (Figure 1).

La télédétection est un outil qui est aujourd'hui couramment employé dans les suivis environnementaux, notamment en raison de la diversité des capteurs existants. Il permet de répondre à diverses problématiques et ce pour des échelles spatiales et temporelles variées. Ainsi, en fournissant une image de la terre, les images satellites vont permettre d'appréhender les modifications des couverts végétaux (AMAN *et al.*, 2001). Dans notre cas, des images issues des satellites Landsat et MODIS<sup>1</sup> sont utilisées afin de mettre en place une analyse diachronique de l'occupation du sol entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé au Bénin. Afin de caractériser au mieux la dynamique de l'occupation du sol et les modalités de transitions entre les différentes classes d'une année à l'autre, la méthode par post-classification est la plus simple à mettre en œuvre (LEFEBVRE *et al.*, 2011).

Pour ce faire 3 grandes étapes ont été nécessaires :

- Après une étape de pré-traitements des données, la cartographie diachronique de l'occupation du sol sur la commune de Djougou a été mise en place entre 1973 et 2000. Puis dans un second temps, nous avons extrapolé les cartographies précédentes à l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé (1973 – 2012).

---

<sup>1</sup> MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

- Mise en place de cartographies des changements et de matrices de conversion afin d'analyser les transitions entre les dates
- Mise en place d'analyses statistiques afin de comprendre les dynamiques de l'occupation du sol à l'œuvre autour de la commune de Djougou notamment au regard de facteurs anthropiques structurants : le réseau de route et les espaces urbanisés.

Ce travail est une reprise et un approfondissement d'un précédent fait par Davide Fabbri en 2011 dans le cadre du projet ECLiS<sup>2</sup>.

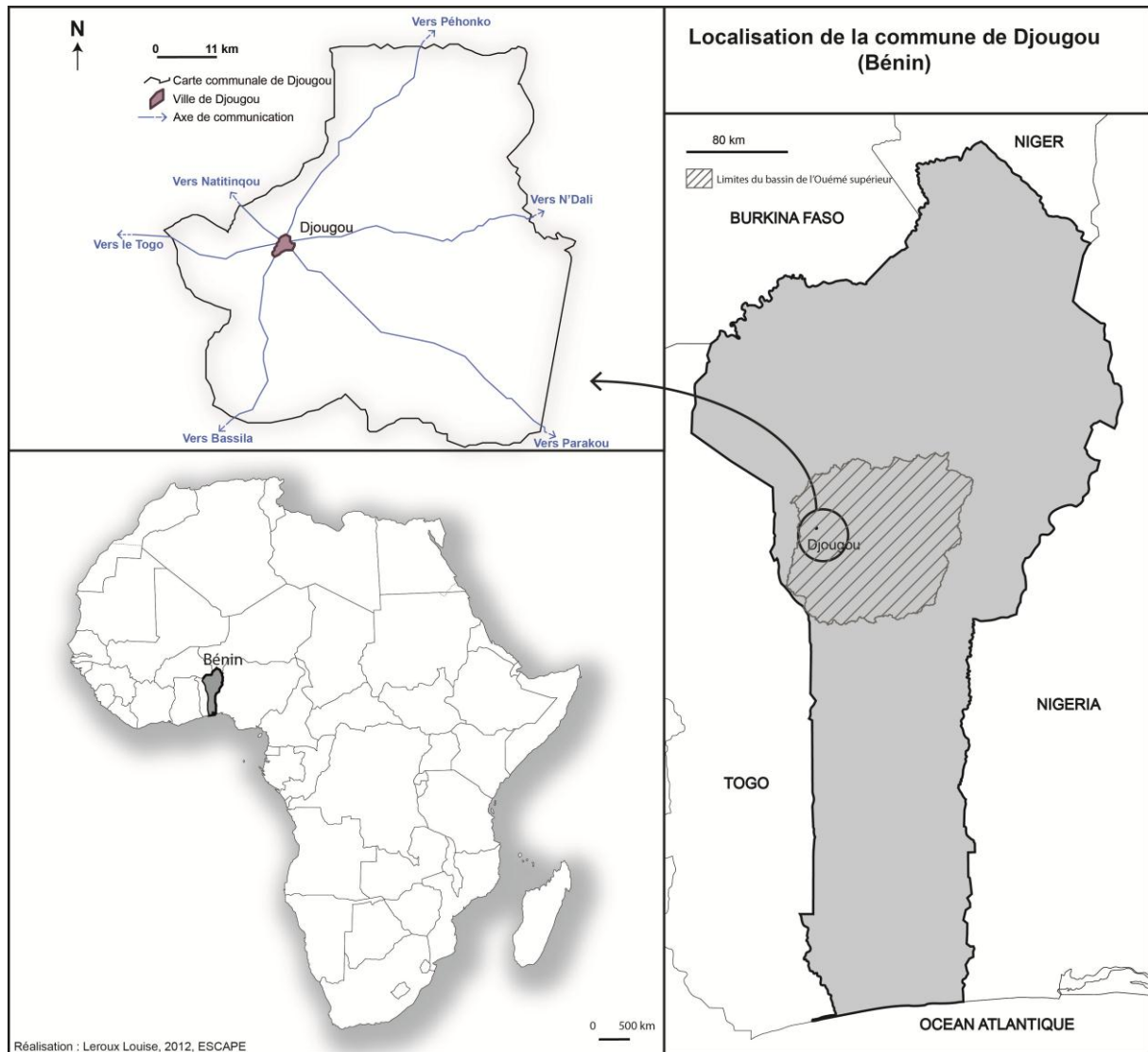


Figure 1: Localisation du bassin supérieur de l'Ouémé et de la commune de Djougou

<sup>2</sup> ECLiS : Elevage, Climat et Société

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Présentation du site d'étude

#### 2.1.1. Présentation générale du bassin supérieur de l'Ouémé

Le bassin supérieur de l'Ouémé est situé dans un contexte climatique soudanien, caractérisé par un climat à deux saisons distinctes et un régime pluviométrique unimodal : une saison sèche de novembre à mars et une saison des pluies d'avril à octobre (HOUNTONDI, 2008). Les moyennes de pluies annuelles dépassent souvent les 1000 mm (VARADO, 2004) pour des températures moyennes annuelles avoisinant les 26°C.

Concernant sa géomorphologie, le bassin supérieur de l'Ouémé est relativement plan, avec des altitudes s'échelonnant entre 192 et 652 m (figure 2). Les altitudes les plus élevées se situent sur la façade Ouest du bassin (Figure 2).

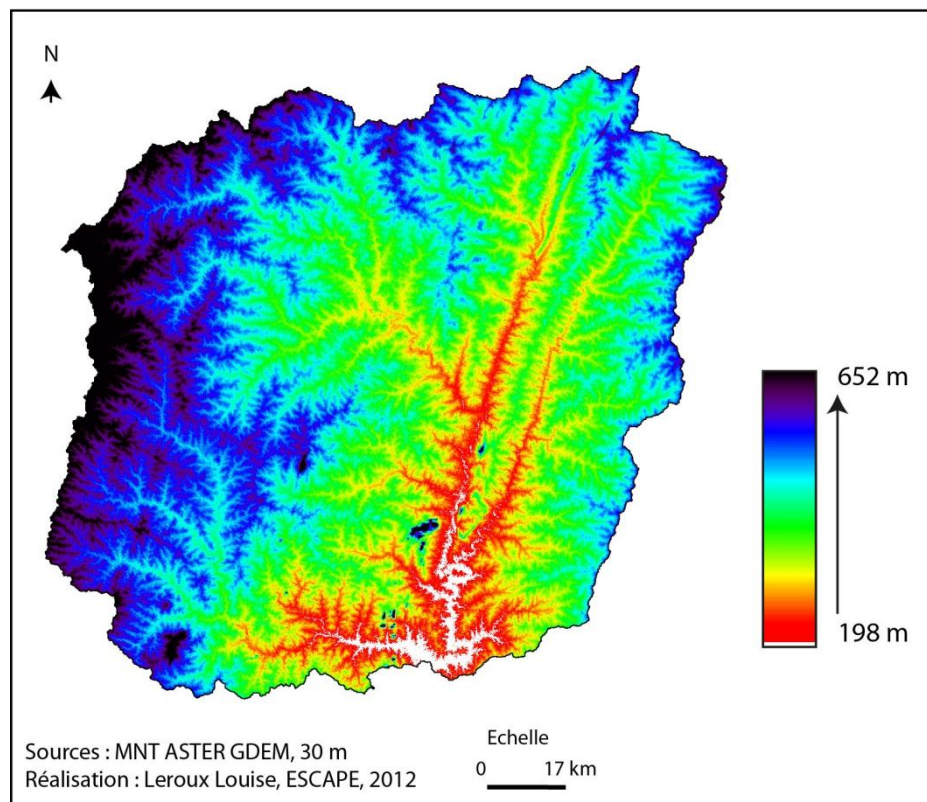


Figure 2 : Modèle Numérique de Terrain (ASTER GDEM) à 30 m de résolution spatiale

Du point de vue démographique, le Bénin, tout comme le reste de l'Afrique de l'Ouest, connaît une forte croissance. La population est passée de 6.8 millions d'habitants en 2002 à près de 8 millions en 2008, avec un taux de croissance estimé à 3.3% par an entre 1992 et 2002. Pour le cas du bassin de l'Ouémé, le taux d'accroissement de la population était de 3.36% en 2009 (TOSSA ET TONOUHEWA, 2009).

Les activités économiques du bassin supérieur de l'Ouémé sont essentiellement centrées autour des pratiques agricoles vivrières (manioc, mil, sorgho, maïs...) ou de rentes (coton, anacarde – KAMAGATE, 2006 ; TOSSA ET TONOUHEWA, 2009). Cependant, pour soutenir la croissance démographique, une extension de ces espaces agricoles est observée, notamment autour des

centres urbains et des principaux axes de communication (routes et pistes). Ainsi, la progression de ces espaces se fait au détriment des espaces de végétation naturelle ou semi-naturelle (forêt, végétation savanicole). Ceux-ci sont défrichés pour permettre la mise en culture de nouvelles parcelles fertiles mais aussi pour extraire le bois afin de le vendre en tant que bois de chauffage ou bois de construction (OLOUKOI *et al.*, 2006 ; TOSSA ET TONOUHEWA, 2009 ; WEZEL *et al* date ?). De plus, les techniques culturales, comme la pratique du brûlis, sont peu favorables à l'environnement (TOSSA ET TONOUHEWA, 2009).

Si la végétation de type « anthropique » domine aujourd'hui, le bassin supérieur de l'Ouémé est caractérisé par une végétation naturelle composée de :

- savanes plus ou moins denses (boisées, arbustives, herbacées)
- forêts claires
- forêts galeries
- forêts classées (Exemple de la forêt de Béléfoungou, au Nord de la commune de Djougou)

(KAMAGATE, 2006 ; OLOUKOI *et al.*, 2006 ; TOSSA ET TONOUHEWA, 2009)

### 2.1.2. Présentation du communal de Djougou

La commune de Djougou, située à l'Ouest du bassin supérieur de l'Ouémé, couvre une superficie de près de 3900 km<sup>2</sup>. Le relief y est majoritairement plan, avec présence d'affleurement granitique, appelés inselbergs. La commune est au carrefour de plusieurs axes routiers majeurs (Figure 1) : l'un en direction Est-Ouest vers le Togo, l'autre en direction Nord-Sud vers Parakou, puis Cotonou.

Depuis les années 1970, la population et la superficie de Djougou ne cessent d'augmenter. Cela se traduit sur le paysage qui est fortement anthropisé aux alentours de la ville et le long des axes de communication. La commune de Djougou ainsi que les nombreux centres habités autour, sont entourés de terrains cultivés qui aujourd'hui s'étendent jusqu'aux limites des forêts. Ceux-ci peuvent être de dimensions et de formes très variées. Puis, les traces de l'activité humaine se réduisent graduellement vers les extrémités Est, Nord-Est et Ouest de la commune, sur des espaces où la végétation est davantage préservée. La végétation naturelle se caractérise par une mosaïque de forêts et de savanes. Deux types de forêts sont présents : la forêt claire à feuillage caduque et la forêt dense sempervirente. On trouve également des forêts galeries ou ripisylves qui se développent le long des cours d'eau. Enfin, près des centres habités, certains espaces de forêt ont été préservés de la déforestation, essentiellement pour des raisons religieuses.

## 2.2. Données

### 2.2.1. Données satellitaires

#### 2.2.1.1. *Les images Landsat*

Le suivi de la dynamique de l'occupation du sol autour de la commune de Djougou a été mis en place à partir d'images satellites issues du satellite à haute résolution spatiale Landsat. En effet, ce dernier permet de bénéficier d'un large corpus de données disponibles depuis le début des années 1970 et permettant d'avoir un suivi régulier sur les 40 dernières années. Pour mener à bien cette étude, nous avons travaillé sur des images issues de 3 capteurs de la série Landsat : MSS<sup>3</sup> pour les années 1970, TM<sup>4</sup> pour les années 1980 et ETM+ pour les années 2000 dont les caractéristiques sont

---

<sup>3</sup> MSS : Multi Spectral Scanner

<sup>4</sup> TM: Thematic Mapper

résumées dans le Tableau 1. Ces images présentent l'avantage d'être disponibles gratuitement sur internet (<http://glovis.usgs.gov/>). De plus, la haute résolution spatiale de ces données (60 m pour MSS et 30 m pour TM et ETM<sup>5</sup>) permet de caractériser des éléments paysagers au sol de 1200 m<sup>2</sup> et 900m<sup>2</sup> (OSZWALD *et al.*, 2010). Ceci est alors suffisant pour identifier les structures paysagères homogènes propres à notre zone d'étude. Afin de garder une cohérence dans la réponse spectrale des différents couverts végétaux, les images ont toutes été acquises pendant la période sèche (mois de Février et Mars). En ce sens, cela permet aussi d'obtenir les différences spectrales les plus grandes entre les éléments paysagers (OSZWALD *et al.*, 2010) notamment l'opposition entre les systèmes de végétation « naturelle » dont la réponse spectrale se distinguera nettement des systèmes « anthropiques » qui seront alors caractérisés à cette époque par une quasi-absence de végétation. Les capteurs Landsat bénéficient aussi d'une bonne résolution radiométrique permettant le calcul de différents indices de végétation comme le NDVI<sup>6</sup>, afin d'améliorer l'identification spectrale des couverts. Enfin, l'utilisation d'images acquises pendant la période sèche permet également d'avoir des images dont la nébulosité est fortement réduite et de limiter ainsi les biais atmosphériques (HOUNTONDI, 2008 ; OSZWALD *et al.*, 2010).

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs Landsat MSS, TM et ETM+

Capteur	Résolution Spectrale (µm)	Résolution Spatiale (m)	Date d'acquisition
Landsat MSS	0.5-0.6	60	10 Novembre 1972
	0.6-0.7	60	7 Février 1973
	0.7-0.8	60	
	0.8-1.1	60	
Landsat TM	0.45-0.52 (Bleu)	30	13 Janvier 1986
	0.52-0.60 (Vert)	30	2 Mars 1986
	0.63-0.69 (Rouge)	30	13 Novembre 1986
	0.76-0.90 (PIR)	30	1 Février 1987
	1.55-1.75 (MIR)	30	
	10.40-12.50 (IRT)	120	
	2.08-2.35 (IRM)	30	
Landsat ETM +	0.45-0.52 (Bleu)	30	13 Février 2000
	0.52-0.60 (Vert)	30	16 Décembre 2001
	0.63-0.69 (Rouge)	30	24 Février 2010
	0.76-0.90 (PIR)	30	
	1.55-1.75 (MIR)	30	
	10.40-12.50 (IRT)	60	
	2.08-2.35 (IRM)	30	
	0.5-0.9 (PANCHRO)	15	

### 2.2.1.2. L'image MODIS

Une image MODIS a également été utilisée pour compléter la cartographie diachronique de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé en 2012. MODIS est un capteur hyperspectral lancée en décembre 1999 (MYNEMI *et al.*, 2002). Il est présent à bord de deux plateformes TERRA et AQUA (BARDUCCI *et al.*, 2009). Dans notre cas, c'est une image issue de TERRA qui a été employée. Pour le suivi des dynamiques d'occupation du sol, celui-ci présente plusieurs avantages :

<sup>5</sup> ETM : Enhanced Thematic Mapper

<sup>6</sup> NDVI : Normalised Difference Vegetation Index

- Données corrigées radiométriquement, atmosphériquement et géométriquement (PENNEC *et al.*, 2011)
- Une haute résolution temporelle, avec une fréquence d'acquisition quotidienne permettant de bénéficier d'un large choix de données (JUSTICE *et al.*, 1998 ; BARDUCCI *et al.*, 2009 ; PENNEC *et al.*, 2011). Les données sont ensuite normalisées sur une semaine
- Des résolutions spatiales variées (250m, 500m, 1km ; JUSTICE *et al.*, 1998)
- Gratuité et disponibilité des données sur Internet

La superficie du bassin supérieur de l'Ouémé est de 14 000 km<sup>2</sup>, l'utilisation du capteur MODIS se justifie donc car la cartographie sera mise en place à une échelle spatiale suffisamment large pour l'utilisation de données à 500 m de résolution spatiale. En revanche, pour cette même raison l'image MODIS ne sera pas utilisée pour la cartographie de l'occupation du sol à l'échelle de la commune de Djougou. Cependant, bien que pertinent, cet outil est à utiliser avec précaution, notamment parce que la résolution spatiale rend complexe l'intégration de données d'occupation du sol hétérogène.

Il existe un grand nombre de produit MODIS. Nous avons ici travaillé à partir du produit Surface Reflectance (MOD9A1) dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2. Une image datant du 25 Janvier 2012 (500 m de résolution spatiale) a été utilisée afin de garder une cohérence spectrale avec les images Landsat. Pour le téléchargement de cette image, la plateforme MRTWeb<sup>7</sup> (<http://mrtweb.cr.usgs.gov/>) a été employée car celle-ci permet de télécharger les images MODIS au format Geotiff, avec projection associée UTM 31 N. Enfin, le téléchargement de plusieurs dalles, comme cela a été notre cas, est facilité par un mosaïquage automatique des tuiles.

Tableau 2 : Caractéristiques du capteur MODIS TERRA

Capteur	Résolution Spectrale (nm)	Résolution Spatiale (m)	Date d'acquisition
MODIS TERRA	620-670 (Rouge)	500 m	25 janvier 2012
	841-876 (PIR)	500 m	
	459-479 (Bleu)	500 m	
	545-565 (Vert)	500 m	
	1230-1250 (MIR)	500 m	
	1628-1652 (MIR)	500 m	
	2105-2155 (MIR)	500 m	

### 2.2.2. Les données photographiques

Pour améliorer la discrimination des éléments paysagers, notamment pour les dates les plus anciennes, des photographies aériennes issues de la mission du PNUD<sup>8</sup> de 1975 ont été utilisées. Trois d'entre elles couvrent en partie la commune de Djougou et ont notamment servi pour aider à la validation des classifications de l'occupation du sol en 1973 (Figure 3). Ces photographies aériennes ont été géoréférencées lors d'un précédent travail par Davide Fabbri.

<sup>7</sup> MRTWeb : Modis Reprojection Tool Web Interface

<sup>8</sup> PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

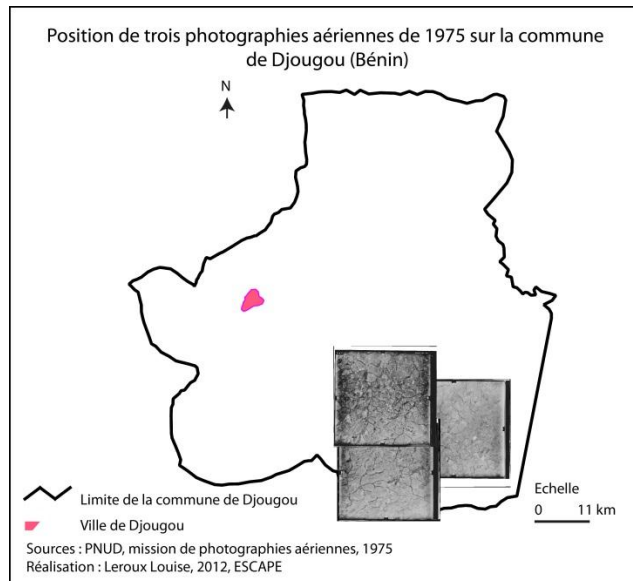


Figure 3 : Localisation des photographies aériennes de la mission IGN de 1975 sur la commune Djougou

### 2.2.3. Les images Google Earth©

Enfin, un troisième jeu de données a été utilisé pour la mise en place de la cartographie diachronique de l'occupation du sol pour les dates les plus récentes. En effet, les images satellites de Google Earth© ont permis de bien identifier les différents types de couverts végétaux et de faire la correspondance avec leur réponse spectrale sur les images satellites Landsat de 2000 et 2010. Ainsi, des images du 24 Octobre 2004 et du 4 Février 2010 ont été utilisées. Elles ont aussi servi pour la validation des classifications, notamment celle de 2000.

## 2.3. Méthodes

### 2.3.1. Mission terrain

#### 2.3.1.1. La prise de points terrain




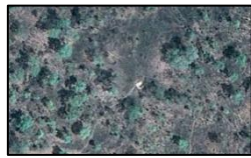
La région est caractérisée par des paysages assez hétérogènes et dont les transitions se font graduellement au travers de mosaïques. La détection des différentes catégories d'occupation du sol à partir des seules images satellites reste difficile, c'est pourquoi il est nécessaire de s'appuyer sur des données terrain (SARR, 2009). La mission terrain a été menée par Davide Fabbri du 16 mars au 28 mars 2011. Celle-ci avait pour but de reconnaître et de définir les éléments paysagers de la zone d'étude et d'effectuer des relevés de points GPS représentatifs de chaque classe d'occupation du sol précédemment définies. Les données ainsi obtenues devaient permettre d'aider à la compréhension des données satellitaires, puis de points de vérité terrain pour la validation de la classification la plus récente (2010). Les points ont été collectés le long de différents transects parcourus à pied ou en voiture. En tout, près de 1000 points GPS ont été acquis et conservés au format .kml<sup>9</sup> (système de projection par défaut WGS84). Puis, pour un certain nombre de points jugés représentatifs, un tableur Excel a été créé permettant de faire la correspondance avec la classe d'occupation du sol concernée et le nom du point tel qu'enregistré dans le GPS.






#### 2.3.1.2. Définition des classes d'occupation du sol




<sup>9</sup> KML : Keyhole Markup Language

L'occupation du sol sur la commune de Djougou est très hétérogène et le passage entre les différentes classes se fait bien souvent sous forme de gradient progressif fonction de la densité du couvert et de la taille des individus. Si de nombreuses classes peuvent être discriminées, nous avons choisis de travailler ici sur 5 classes principales pour mettre en œuvre la classification. Certaines d'entre elles ont été regroupées par analyses préalables (Tableau 3). En effet, plus la typologie de départ est détaillée, plus la discrimination des classes est difficile. Ainsi, selon BIGOT *et al* (2005), l'utilisation de 4 à 6 classes d'occupation du sol est bien souvent suffisante pour mettre en place une analyse cartographique sur ce genre de paysage.

Tableau 3 : Identification et définition des classes d'occupation du sol présentes sur la commune de Djougou

Classe	Sous classe	Définition	Exemple
<b>Forêt / Ripisylve</b>	Forêt dense	Végétation très dense, peuplement continu d'arbres à caractère sempervirent de près de 10 m (WHITE, 1983)	
	Ripisylve	Forêt très dense située le long des cours d'eau et dans les bas-fonds. Les indices des végétations seront élevés toute l'année. Noter la présence de brûlis	
	Forêt claire	Végétation composée principalement d'arbres, avec des sous-bois peu développés avec un recouvrement des cimes de 40% au plus (WHITE, 1983). Les arbres sont souvent à feuilles caduques avec un indice de végétation faible en saison sèche. Noter la présence de brûlis	
<b>Savane</b>	Savane arborée	Végétation relativement dense mais avec des arbres de taille inférieure à 10 m, sous-bois arbustif. Noter la présence de brûlis	

	Savane arbustive	Végétation arbustive avec des arbres de taille inférieure à 6 m. Les savanes ont un indice de végétation qui sera plus faible que les forêts en saison sèche. Noter la présence de brûlis	
<b>Culture / Jachère</b>	Culture	Surfaces cultivées, d'étendues variables situées à proximité des centres urbains ou le long des routes. Ces parcelles sont souvent à nu pendant la période sèche, leur réflectance sera maximale	
	Culture arborée	Cette classe regroupe les parcelles d'Anacardiés, reconnaissable à leur forme régulière, avec plantation d'arbre régulier. S'ajoute les vergers, souvent de forme carrée.	
	Jachère	Ancienne parcelle cultivée laissée à l'abandon avec un enrichissement progressif. Confusion possible avec la classe de savane arbustive. Noter la présence de brûlis	
<b>Sol urbain / Sol nu / Inselberg</b>	Village - Route	Comprend les centres habités, les routes asphaltées, et les pistes. Zone où la végétation naturelle a été éliminée sur de larges étendues (WHITE, 1983)	

	Sol nu	Classe qui comprend les terrains de football, cours d'école...Il s'agit de sol nu, rouge, qui se recouvre d'herbe dans la saison des pluies et pendant la saison sèche, forte confusion avec les parcelles de cultures à nu	
	Inselberg	Massifs granitiques de taille variable présents ponctuellement sur la commune	
<b>Eau</b>		Il s'agit de la retenue d'eau présente au Sud Ouest du centre de Djougou	

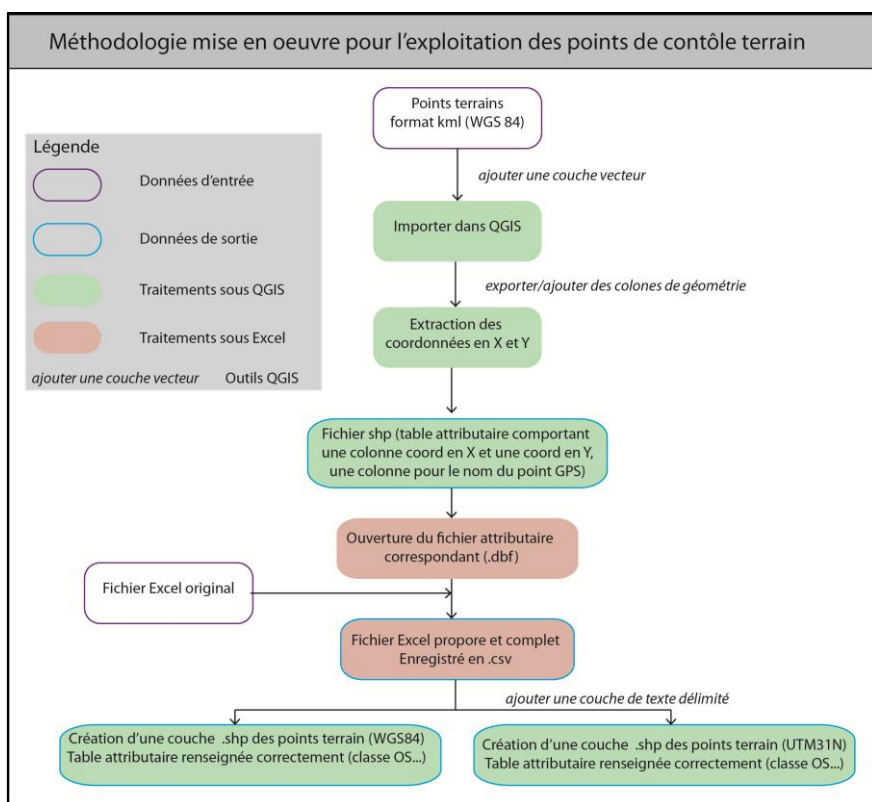
(Sources : Google Earth©, 4 Février 2010)

### 2.3.1.3. Traitements des points GPS

Comme dit précédemment, les points GPS pris par Davide Fabbri ont été fournis au format .kml donc difficilement exploitables, notamment dans le cas de leur utilisation en tant que points de contrôle terrain. De plus, les fichiers n'étaient pas cohérents dans leur organisation, avec bien souvent des points redondants. Il n'y avait pas non plus de correspondance faite entre le fichier Excel décrivant les points et le fichier de points GPS. Les coordonnées géographiques des points n'étaient pas connues, du moins, ils n'avaient pas été retranscrits au propre dans un fichier spécifique. Avant l'exploitation des points de la mission terrain, un travail de nettoyage et de remise en forme des fichiers a été fait. L'objectif est d'obtenir un fichier Excel dans lequel l'ensemble de la mission terrain était présenté et utilisable par la suite. Ce fichier doit être de la forme suivante :

Coord X	Coord Y	Num du point	Date	Nom du transect	Nom du point GPS	Classe d'OS	Position de la parcelle / au point	Commentaire

La Figure 4 présente la méthodologie suivie, celle-ci a été mise en œuvre majoritairement sous le logiciel Quantum GIS 1.8.



**Figure 4 : Méthodologie mise en oeuvre pour la mise en forme et l'exploitation des points de contrôle terrain de la mission de Mars 2011**

Le résultat obtenu est une couche de points au format .shp<sup>10</sup>, format standard utilisé par la majorité des logiciels de SIG et de traitement d'image, dont la table attributaire renseigne la classe d'occupation du sol. Cette couche peut alors être employée pour valider les classifications. Le système de projection associé aux images Landsat étant l'UTM 31 N<sup>11</sup>, la couche a également été reprojetée dans ce même système.

### 2.3.2. Cartographie diachronique de l'occupation du sol sur la commune de Djougou

Pour mettre en place les différentes cartographies de l'occupation du sol, l'ensemble des traitements ont été réalisés sous le logiciel ENVI 4.7. Le choix d'appliquer des classifications orientées-pixels a été fait.

#### 2.3.2.1. Reconnaissance spectrale des classes d'occupation du sol à partir de l'image de 2010

Le traitement des images satellites doit se faire après une étape d'analyse initiale des objets d'étude et leur définition. Cette étape est essentiellement visuelle (BIGOT *et al.*, 2005).

Les points de contrôle terrain ayant été pris en 2011, la reconnaissance spectrale des classes d'occupation du sol doit se faire à partir d'images satellites récentes. Pour ce faire, des images Landsat ETM+ du 24 Février 2010 ont été utilisées. Cependant, depuis 2004 le capteur ETM+ connaît

<sup>10</sup> SHP : SHaPefiles

<sup>11</sup> UTM 31 N : Universal Transverse Mercator zone 31 Nord

une panne de son système de balayage, par conséquent les images sont fortement bruitées ce qui réduit considérablement la partie de l'image utilisable pour la classification. Les traitements ont donc été appliqués à la zone de Bétérou, situé bien au Sud Est de la commune de Djougou. Par ailleurs, sur cette zone, les images Google Earth© sont également disponibles. Par conséquent, la reconnaissance spectrale et l'interprétation des classes d'occupation du sol a été possible par la visualisation en simultanée (Figure 5) :

- Des points de contrôle terrain au format .kml projetés sous Google Earth©
- Des points de contrôle terrain au format .shp superposés à une composition colorée de l'image satellite ETM+ sous ENVI. La composition colorée est une combinaison linéaire de trois canaux de l'image, ce qui permet d'obtenir une image synthétique tout en bénéficiant de l'apport en termes de spécificité spectrale de chacune des bandes (BOUGHERARA, 2006). Elle permet d'avoir une meilleure discrimination des objets géographiques (SARR, 2009)

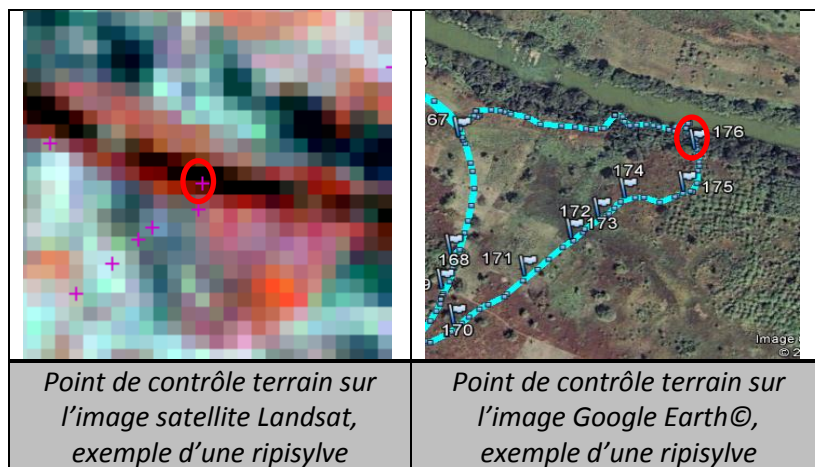


Figure 5 : Exemple de reconnaissance spectrale d'une ripisylve par comparaison avec une image Google Earth©

### 2.3.2.2. Méthodologie générale : Classification supervisée des images satellites

Après l'identification et la reconnaissance spectrale des classes d'occupation du sol sur la zone de Bétérou à partir de l'image de 2010, les classifications de l'occupation du sol sur la commune de Djougou en 1973, 1986 et 2000 par correspondance spectrale ont pu être mises en place selon la méthodologie présentée en Figure 6. Cependant, plus on remonte dans le temps, plus la qualité des images diminue, de ce fait le degrés de précision est moins important et peut engendrer des erreurs (OSZWALD *et al.*, 2010).

Auparavant, une étape de pré-traitements des images a été nécessaire. D'une part, pour couvrir l'ensemble de la commune de Djougou il faut utiliser 4 scènes pour les capteurs MSS et TM et 2 scènes pour ETM+. Un mosaïquage de différentes scènes a donc été appliqué. D'autre part, nous voulons effectuer une comparaison de la même zone à des dates différentes. De ce fait, pour corriger les éventuels biais atmosphériques, des corrections radiométriques ont également été faites afin de passer de valeur de pixel en compte numérique en valeur de réflectance (outil Landsat Calibration de ENVI). Enfin, afin d'augmenter la discrimination des différents couverts végétaux, un indice de végétation a été calculé, il s'agit du NDVI (Eq.1). Cet indice permet de donner une estimation de l'activité chlorophyllienne à différents stades phénologiques (DJOUFACK, 2011).

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \text{ (Eq.1)}$$

C'est un indice normalisé (DAVRANCHE, 2008), de ce fait les valeurs s'échelonnent de -1 à 1 où :

[0,+1[ = végétation avec une forte activité chlorophyllienne

[-1, 0[ = espace en eau, fortement humide

0 = sol nu

Dans notre cas, pour la discrimination entre la classe des savanes et la classe des forêts, nous avons considéré que la première classe avait des valeurs de NDVI comprise entre 0.2 et 0.4 et que la seconde classe était > à 0.5.

Puis, une classification par méthode supervisée a été mise en place sur les images de 1973, 1986 et 2006 à partir de l'ensemble des canaux et du NDVI calculé. Ce type de classification impose une intervention de l'utilisateur qui doit définir des ensembles de points caractéristiques et représentatifs des classes d'occupation du sol sur l'image. Cette étape consiste en la création d'une base d'apprentissage, ou prise d'échantillons terrain. Elle nécessite donc une bonne connaissance du terrain (ROBIN, 2002 ; ENONZAN, 2010). Avant d'extrapoler les échantillons terrain à l'ensemble de l'image, il est nécessaire de vérifier que nos classes sont correctement discriminées. Pour ce faire, un test de séparabilité des classes a été fait. Dans notre cas, un test basé sur la distance de Jeffries-Matusita et sur l'indice de divergence transformée a été appliqué à nos échantillons terrain. Les valeurs s'échelonnent entre 0 et 2 (RICHARDS, 1999 ; SKUPINSKI *et al.*, 2009). Des classes dont la valeur est supérieure à 1.9 sont considérées comme bien séparables, entre 1.6 et 1.9, des échantillons terrains pour les classes concernées ont été repris, enfin pour des valeurs inférieures, les classes ont été supprimées et/ou refaites.

Par ailleurs, c'est l'algorithme du Maximum de vraisemblance qui a été appliqué. Cette méthode repose sur les caractéristiques statistiques des échantillons représentatifs des classes précédemment identifiées sur l'image. L'algorithme affecte ensuite chaque pixel de l'image à la classe d'occupation du sol à laquelle il a la plus forte probabilité d'appartenir (ROBIN, 2002). Au total, pour chaque classification, les cinq classes d'occupation du sol précédemment définies ont pu être discriminées (Eau, sol nu/sol urbain/inselberg, forêt/ripisylve, savane, culture/jachère).

Enfin, la précision des classifications obtenues a été évaluée à travers l'utilisation d'une matrice de confusion. Pour ce faire, elles ont été confrontées à des relevés terrains extraits d'images Google Earth ou de photographies aériennes. Deux indices de validation de classification sont employés :

- La précision globale : caractérise la proportion de pixels bien classés, calculé en pourcentage
- L'indice de Kappa : caractérise le rapport entre les pixels bien classés et le total des pixels sondés (SKUPINSKI *et al.*, 2009). De plus, une étude portant sur l'occupation des terres peut être validée si l'indice de Kappa est compris entre 50% et 75% (PONTIUS, 2000).

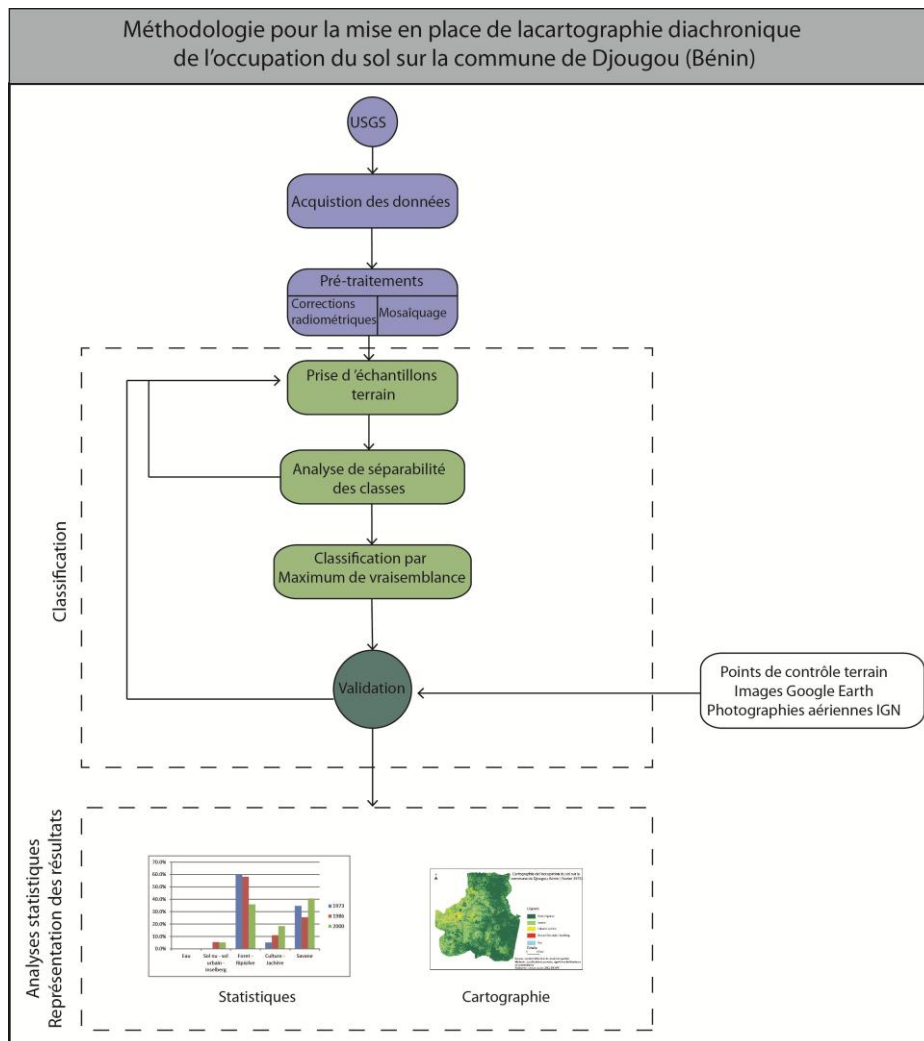


Figure 6 : Schéma méthodologique pour la mise en place de la cartographie diachronique de la dynamique paysagère sur la commune de Djougou

### 2.3.2.3. Classification supervisée de l'image de 2010

Dans le cas de l'image de 2010, l'identification des différentes classes n'a pas posé de problèmes, celles-ci ayant des signatures spectrales bien marquées. Les sols nus ou urbains présentent par exemple des valeurs de réflectance très forte dans l'ensemble des bandes radiométriques, mais se caractérisent en revanche par des valeurs de NDVI faibles (Figure 7, bandes 8 à 10). De même, les parcelles cultivées ressortent comme des sols nus car nous sommes en période sèche et sont caractérisées par des valeurs de NDVI légèrement plus élevées que pour les sols urbains (Figure 7, bandes 8 à 10). L'analyse des courbes des signatures spectrales pour ces deux classes montre d'ores et déjà une faible variabilité à l'intérieur de chaque classe, mais également entre elles.

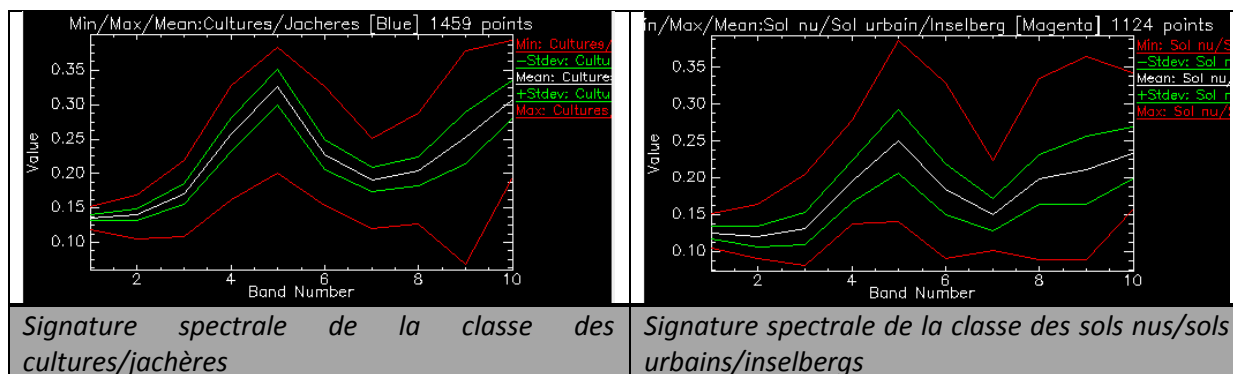


Figure 7: Comparaison des signatures spectrales des classes cultures/jachères et sols nus/sols urbains/inselbergs

L'analyse de séparabilité des classes montre que pour cette paire de classes, la différenciation est la moins précise (1.7-1.94 - **Annexe I page 47-50**), il risque donc d'y avoir des confusions dans l'attribution des pixels comme l'atteste la Figure 8. En effet, on peut y voir une zone de confusion dans la répartition des valeurs spectrales pour les deux classes considérées pour la bande du rouge (bande plus sensible à la présence de sols nus). Déjà, BIGOT *et al* (2005) avaient montré en 2005, sur leur étude portant sur l'ensemble du bassin de l'Ouémé, une difficulté à discriminer entre ces deux classes sur des images prises en période sèche. Il faut noter que pour cette date, l'image étant plus précise les classes culture arborée ainsi que zone marécageuse ont pu être discriminées.

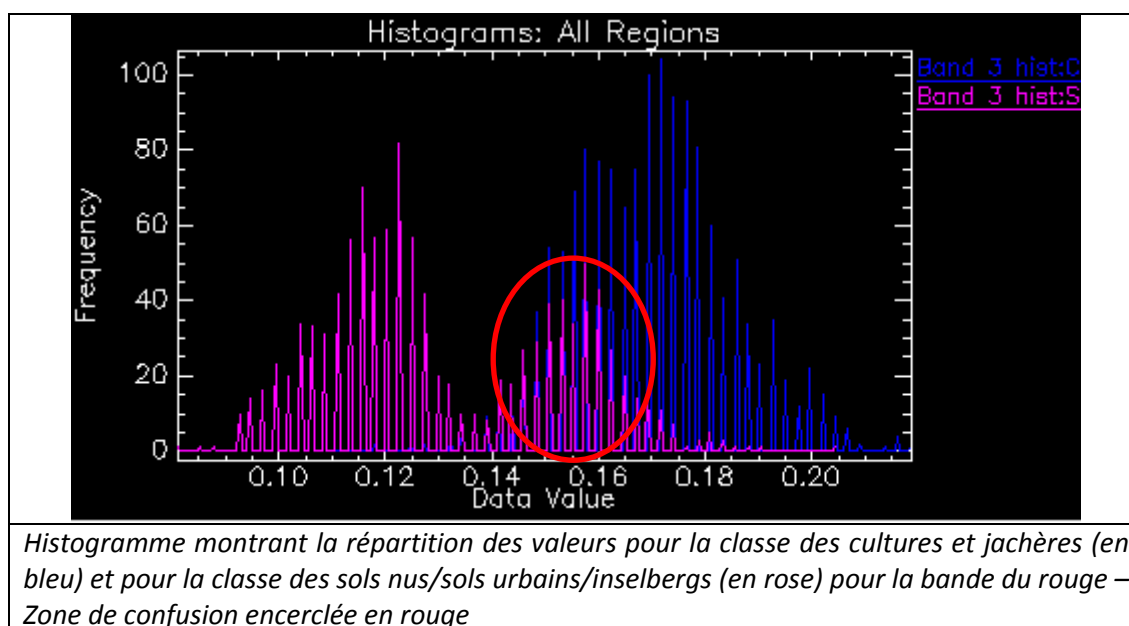


Figure 8 : Histogramme de la répartition des valeurs spectrales sur la bande du PIR des classes de culture/jachère et de sols nus/sols urbains/inselbergs

Pour la validation de la classification, les points de contrôle terrain pris par Davide Fabri lors de la mission de Mars 2011 ont été utilisés. Cependant, en les projetant sous Google Earth®, on peut se rendre compte que ceux-ci n'ont pas été pris exactement au sein des parcelles concernées mais plutôt « à vue ». De ce fait, ils ne peuvent pas être employés en tant que tels comme points de validation. Nous nous sommes donc appuyés dessus pour recréer un fichier de points de vérité terrain en essayant d'identifier, dans l'entourage proche des points GPS, les parcelles concernées. Les résultats de la validation pour l'ensemble des classifications sont présentés dans le Tableau 4, le détail des matrices de confusion est présenté en **Annexe II page 51-53**. Avec une précision globale à 91.50% et un indice de Kappa de 0.89, la classification peut être considérée comme satisfaisante.

#### 2.3.2.4. Classification supervisée de l'image de 2000

Pour la classification de l'année 2000, un NDVI a également été réalisé. De plus, pour faciliter la discrimination des parcelles de cultures, mais également la discrimination entre les espaces de savanes et les espaces de forêts, des NDVI réalisés sur des images du 26 Octobre 2000 (fin de la saison des pluies, le développement des couverts végétaux y est donc encore important - SARR, 2009) et 16 Décembre 2001 ont été intégrés à notre image initiale. De plus, cela permet également de résoudre les problèmes de classification qui peuvent être liés aux parcelles brûlées (qui sont soit des parcelles de cultures brûlées après la saison des pluies, soit des anciennes parcelles de forêt que l'on brûle pour pouvoir mettre en culture de nouveaux espaces).

Là encore, pour les classes culture et sol nu/urbain le test de séparabilité est quasiment le même que précédemment (1.68-1.98), mais c'est pour les classes de savane et forêt qu'il est le moins bon (1.55-1.92- **Annexe I page 47-50**).

Pour valider la classification de 2000, Davide Fabbri avait utilisé une autre classification de la zone en 2000 réalisée dans le cadre du programme IMPETUS GLOWA (<http://www.impetus.uni-koeln.de/fr/projet/>). Cependant, après comparaison entre cette classification et les images Google de 2004, des incohérences ont été notées, notamment une forte confusion entre les classes de culture et du bâti (Figure 9). Ceci est particulièrement visible autour de la ville de Djougou, où la majorité des espaces bâtis a été classée en tant que zone de cultures.

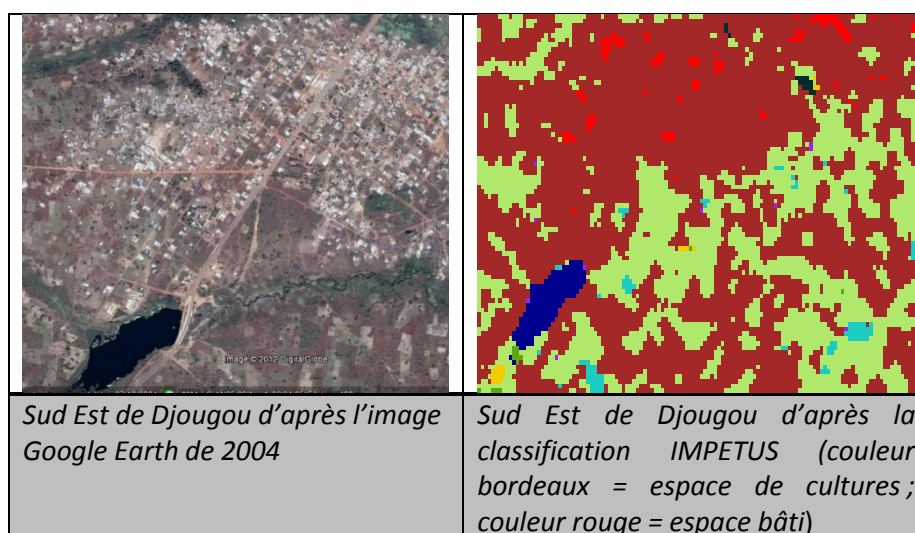


Figure 9 : Exemple d'une imprécision sur la classification IMPETUS de 2000 par comparaison avec une image Google Earth© de 2004

Pour valider la classification de 2000, la décision de créer des points de contrôle terrain par photo-interprétation de l'image Google Earth© de 2004 a été faite. Compte tenu de cette difficulté, la précision globale est de 95% et l'indice de Kappa de 0.85, ce qui reste correcte (Tableau 4).

#### 2.3.2.5. Classification supervisée de l'image de 1986

Pour réaliser cette classification, comme précédemment, un NDVI a été calculé pour la date du 29 Novembre 1986 et ajouté à l'image initiale. Pour cette année, l'ensemble des classes d'occupation du sol présente une bonne séparabilité d'après les résultats du test (**Annexe I page 47-50**). Ne disposant pas de données pour valider la classification de 1986, un deuxième fichier de parcelles d'entraînement considéré comme « vérité terrain » a été créé pour pouvoir le comparer à celui utilisé pour la mise en place de la classification. C'est la raison pour laquelle la précision globale

et l'indice de Kappa sont les plus forts pour cette classification (respectivement 97% et 0.90 - Tableau 4).

### 2.3.2.6. Classification supervisée de l'image de 1973

Le satellite Landsat a été lancé en 1972, de ce fait pour cette période, la fréquence d'acquisition est moindre. La classification a donc été faite sur l'image de base ainsi que sur un NDVI uniquement pour la période considérée. Du fait de la qualité de l'image, c'est ici les classes de savane et de forêt qui présentent la moins bonne séparabilité (1.75-1.99). Pour valider la classification, des points de contrôle terrain ont été pris par photo-interprétation des photographies aériennes de 1975. La précision globale de cette classification est de 90% (indice de Kappa 0.85 - Tableau 4).

Tableau 4 : Tableau récapitulatif de la précision des classifications sur la commune de Djougou

Classification	Précision Globale	Indice de Kappa	Classes avec le plus d'erreurs
2010	91.50 %	0.89	
2000	95%	0.85	Sol nu / sol urbain Culture Savane
1986	97%	0.90	Sol nu / sol urbain Culture Savane
1973	90%	0.85	Sol nu / sol urbain Savane Forêt

### 2.3.3. Cartographie de l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé

Pour la cartographie de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé, la même méthodologie que précédemment a été appliquée. Cependant, au vu de la taille du bassin, seules quatre classes ont été considérées :

- Forêt/ripisylve
- Savane
- Culture/jachère
- Sol nu/sol urbain/inselberg

La classe eau n'a pas été conservée.

Les mêmes images que celles utilisées pour la cartographie de l'occupation du sol sur la commune de Djougou ont été employées.

#### 2.3.3.1. Classification supervisée de l'image de 2000

Pour l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé, pour l'image de 2000, la présence d'un voile nuageux important est à noter. Ainsi, pour ne pas fausser l'analyse, un masque a été appliqué afin de supprimer ce nuage.

Une fois les parcelles d'entraînement prises, les tests de séparabilité montrent que les classes qui se séparent le moins bien sont les classes de savane et de forêt (1.6 – 1.9 - **Annexe I page 47-50**). Ce phénomène est alors particulièrement visible lors de l'analyse des histogrammes pour chacune des deux classes sur la bande du PIR (grande sensibilité à l'activité chlorophyllienne). Il est à noter ici

que la classe des forêt/ripisylves possède en moyenne des valeurs de réflectance plus faibles que pour la classe de savanes (Figure 10). En effet, des forêts sur bas-fond (donc avec forte influence de l'humidité sur le signal radiométrique), sont prises en considération, expliquant ces valeurs de réflectance en deçà de ce qui pourrait être attendu.

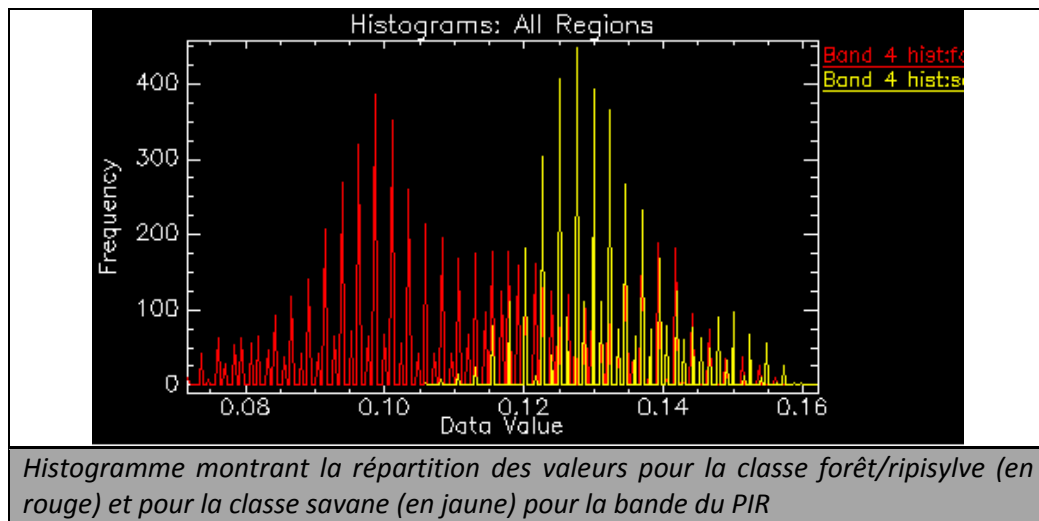


Figure 10 : Histogramme de la répartition des valeurs spectrales sur la bande du PIR des classes de forêt/ripisylve et de savane

Pour la validation de la classification, nous nous sommes à nouveau appuyés sur l'image Google Earth© de 2004. L'indice de précision globale est de 96% et l'indice de Kappa de 0.93, avec une confusion entre les classes de forêt et de savane (Tableau 5).

### 2.3.3.2. Classification supervisée de l'image de 1986

Les tests de séparabilité pour cette classification montrent là encore une difficulté à discriminer entre les classes de savane et de forêt, mais dans une proportion moindre (1.7 – 1.9). En l'absence de points de contrôle terrain pour cette date, un deuxième fichier de parcelles d'entraînement a été pris pour pouvoir valider la classification. De ce fait, si l'indice globale de 99% et l'indice de Kappa de 0.98 permettent de la valider, cela ne représentent aucune valeur statistique (Tableau 5).

### 2.3.3.3. Classification supervisée de l'image de 1973

Enfin, pour cette dernière classification, les tests de séparabilité pour les classes savane et forêt sont les moins bons (1.52-1.87). Pour la validation de la classification, les points extraits à partir des photographies aériennes de 1975 pour la classification de Djougou, ont été ré-utilisés. A défaut de posséder une couverture aérienne sur l'ensemble du bassin, d'autres parcelles d'entraînement ont été prises manuellement. La précision globale est de 89% et l'indice de Kappa de 0.80 (Tableau 5). Tout comme précédemment, la valeur statistique de ce test de validité est à remettre en considération.

### 2.3.3.4. Classification supervisée de l'image de 2012

Pour mettre en place la cartographie de l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé, une classification supervisée (également Algorithme du Maximum de vraisemblance) a été appliquée. Cependant, au vu de la résolution spatiale des données (500 m), seules 3 classes ont été discriminées :

- Forêt / Ripisylve
- Espace savanicole
- Culture / Jachère / Sols urbains / Sols nus

Les tests de séparabilité sont globalement bons, avec cependant une difficulté à discriminer les savanes des deux autres classes (1.74-1.91 avec les cultures ; 1.72-1.93 avec les forêts). La résolution spatiale est trop basse pour que l'on puisse utiliser les points de contrôle terrain pour valider la classification. Une classification non-supervisée a donc été réalisée pour servir de validation (SARR, 2009). Au total, 10 classes ont été discriminées, puis celles-ci ont été regroupées au sein des 3 classes identifiées précédemment. La précision globale est de 79 % et l'indice de Kappa de 0.68 (Tableau 5). La classification, malgré des résultats inférieurs aux classifications Landsat, reste correcte.

**Tableau 5 : Tableau récapitulatif de la précision des classifications sur le bassin supérieur de l'Ouémé**

<b>Classification</b>	<b>Précision Globale</b>	<b>Indice de Kappa</b>	<b>Classes avec le plus d'erreurs</b>
<b>2012</b>	79%	0.68	Savane
<b>2000</b>	96%	0.93	Forêt / Ripisylve Savane
<b>1986</b>	99%	0.98	Sol nu / sol urbain Culture / Jachère Forêt / Ripisylve
<b>1973</b>	89%	0.80	Forêt Culture / Jachère

### 3. Résultats

#### 3.1. Cartographie diachronique de l'occupation du sol

##### 3.1.1. Cartographie de l'occupation du sol autour de Bétérou

La Figure 11 présente la cartographie de l'occupation du sol autour de Bétérou. On y voit alors nettement l'opposition entre un système de végétation spontanée (forêt et ripisylve) ou semi naturelle (savane) et un système de végétation plus anthropique constitué de parcelles de cultures et de cultures arborées, organisées autour du centre urbain. On peut cependant constater une forte prédominance de cette dernière classe, due à une confusion avec la classe des cultures et jachères en raison d'une signature spectrale relativement proche à cette période de l'année (saison sèche).

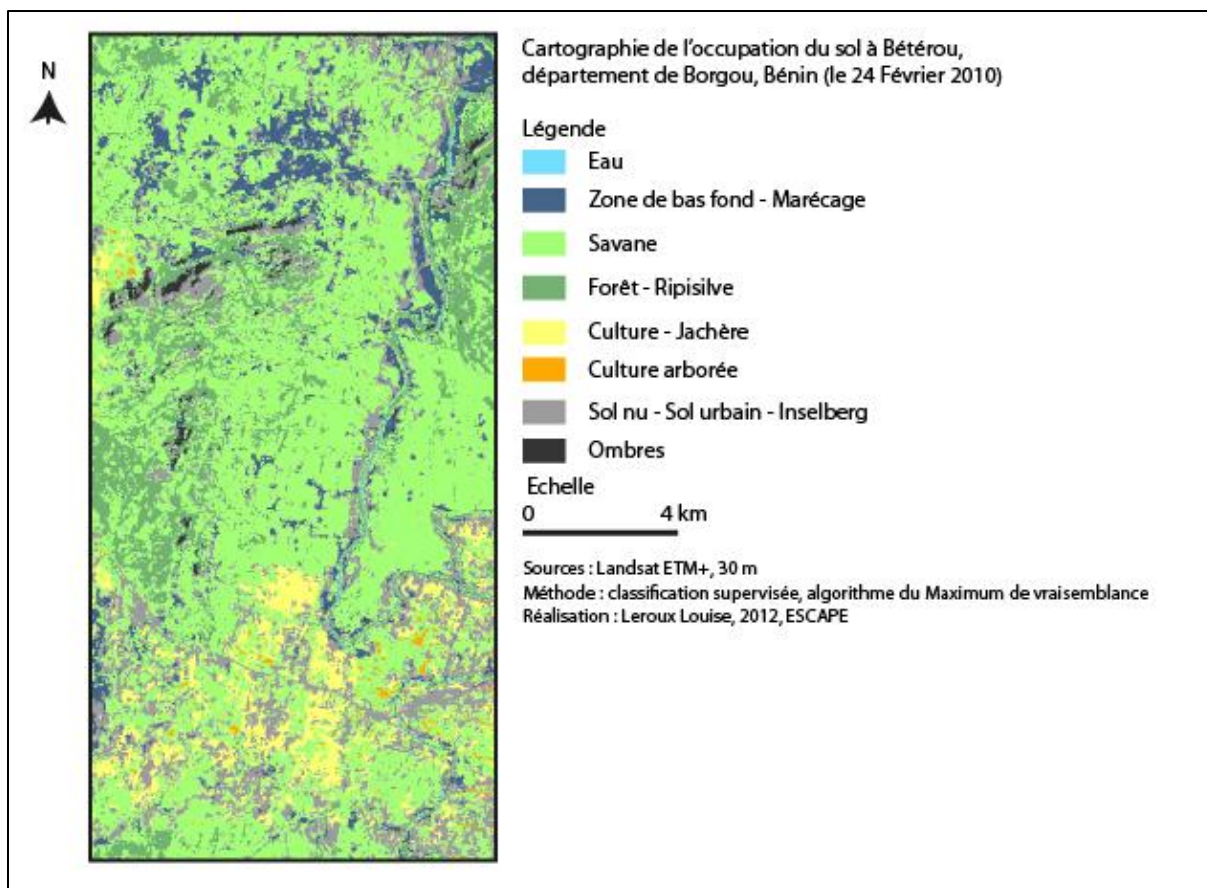
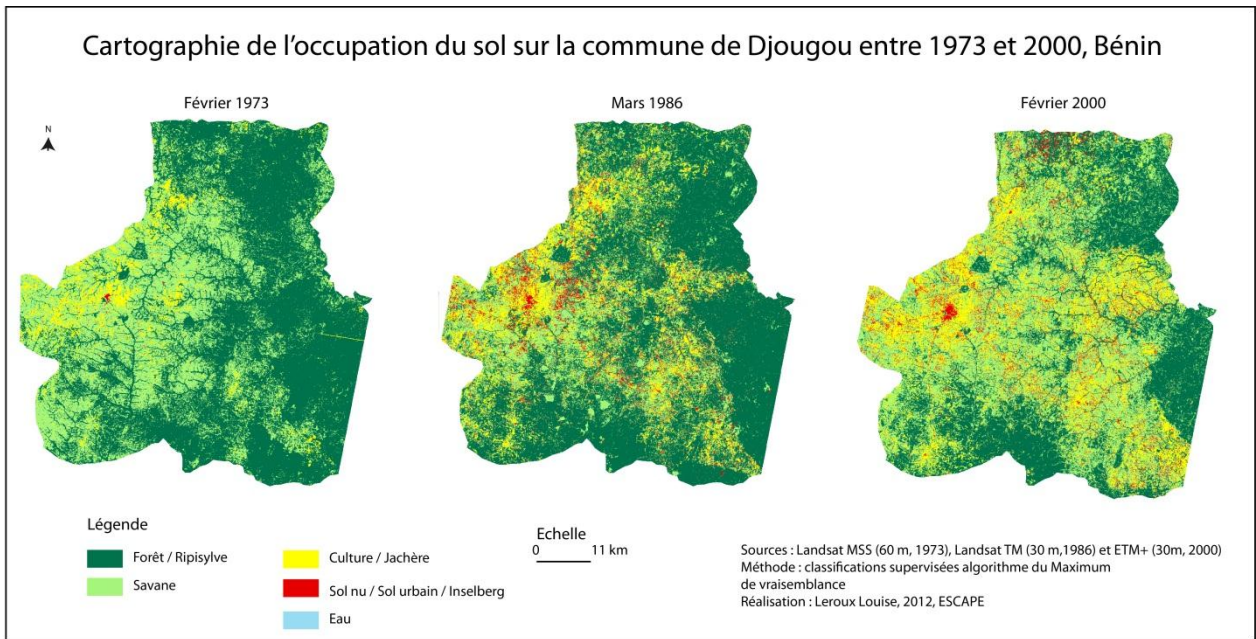


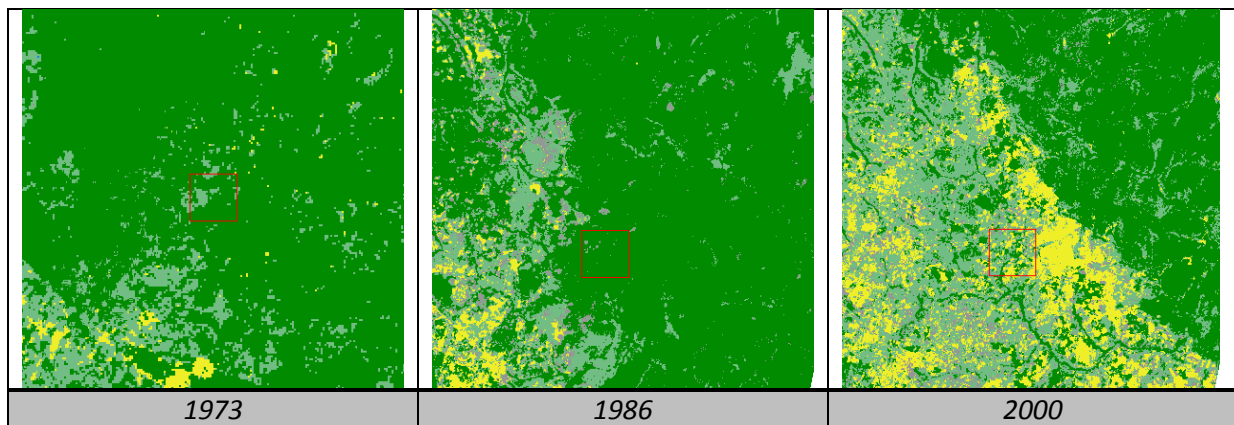
Figure 11 : Cartographie de l'occupation du sol autour de la commune de Bétérou en 2010

### 3.1.2. Cartographie diachronique de l'occupation du sol sur la commune de Djougou (1973-2000)

La présentation des 3 cartographies fait ressortir visuellement une nette évolution de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 sur la commune de Djougou, avec notamment une progression des espaces de cultures et urbains au détriment des espaces de forêt et de savane (Figure 12). Cette progression est particulièrement prononcée dans la partie Sud-Est de la commune en relation avec l'axe routier qui relie Djougou à Bétérou comme l'atteste la Figure 13. On y note alors la présence d'un véritable front de déforestation.



**Figure 12 : Cartographie de l'occupation du sol sur la commune de Djougou en 1973, 1986 et 2000**



**Figure 13 : Dynamique paysagère, l'exemple le long de l'axe routier menant à Bétérou**

### 3.1.3. Cartographie diachronique de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé (1973 – 2012)

La même dynamique que celle observée à l'échelle de la commune de Djougou est notable pour l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé. Bien que la cartographie de 2000 soit en partie tronquée par la présence du nuage, la progression des espaces de cultures au détriment des espaces de forêt et savaniques est visible entre 1973 et 2012 (Figure 14).

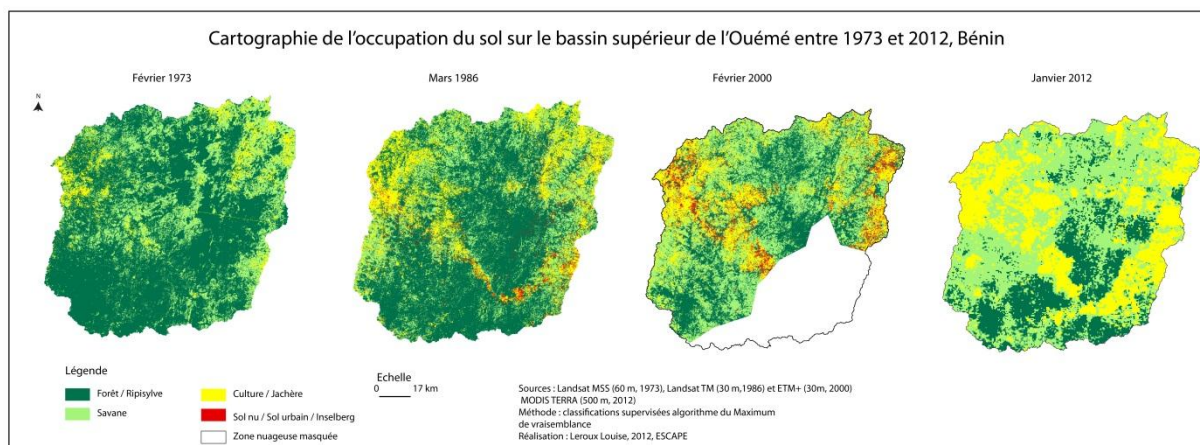


Figure 14 : Cartographie de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé en 1973, 1986, 2000 et 2012

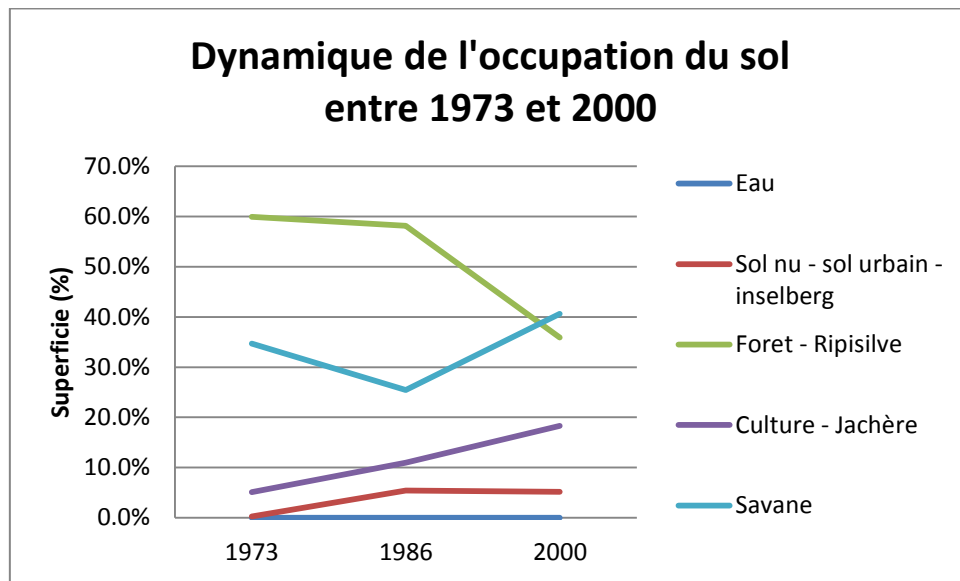
## 3.2. Changements d'occupation du sol entre 1973 et 2012

### 3.2.1. Autour de la commune de Djougou (1973-2000)

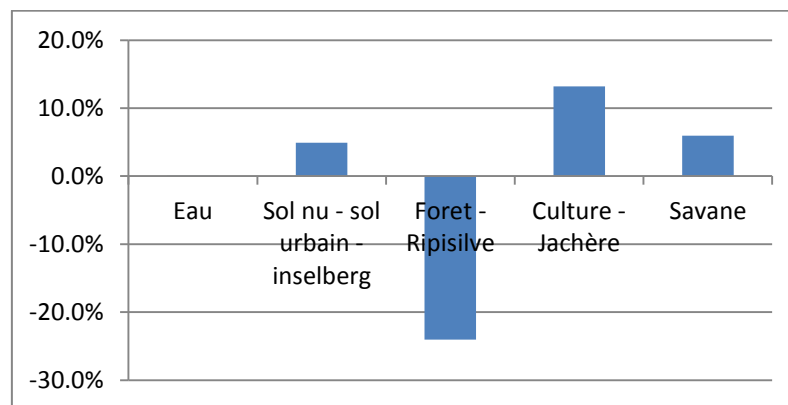
La mise en place de statistiques d'évolution confirme alors ce qui a pu être observé visuellement (Graphique 1 et Graphique 2) :

- *Eau* : Cette classe n'évolue pas car seule la retenue d'eau située au sud de la ville de Djougou entre dans cette catégorie.
- *Sol nu / sol urbain* : Les espaces bâtis augmentent de près de 5% par rapport à leur surface initiale, avec une augmentation plus importante entre 1973 et 1986, ceci conformément à la croissance démographique observée sur la région. Ce phénomène provient alors certainement de la confusion entre les sols nus et les cultures pour l'année 1986. En effet, d'après la matrice de confusion (**Annexe II page 51-53**), près de 10% des espaces de cultures ont été classés en sol nu pour cette année là. Cependant, ceci ne fausse pas la tendance générale qui est à une anthropisation de la zone.
- *Culture / jachère* : Pour soutenir la croissance démographique de la zone et conformément à l'augmentation des espaces urbanisés, la tendance est également à l'augmentation des espaces des cultures (+12,5% de leur superficie initiale).
- *Savane* : La classe des savanes (regroupant les savanes arborées et les savanes arbustives) connaît elle aussi une augmentation globale entre les deux dates (+6%). Cependant, selon le Graphique 1, on peut constater une régression de cette classe entre 1973 et 1986. Au vu de la tendance générale, il semble plus que cela corresponde à une erreur de classification. En effet, toujours d'après la matrice de confusion, près de 20% des pixels initialement classés en savane ont été attribués à la classe des cultures. Ceci provient alors de la difficulté à discriminer entre une savane arbustive et une jachère ancienne.
- *Forêt / ripisylve* : C'est la seule classe qui perd de sa superficie entre 1973 et 2000. On observe un véritable mitage de cette classe au profit de la végétation anthropisée et semi-naturelle. Les forêts perdent près de 24% de leur superficie initiale, avec une tendance qui semble s'accroître entre 1986 et 2000. La forêt est alors défrichée pour pouvoir permettre

dans un premier temps la construction de route, puis dans un second temps la création de parcelles de culture le long de ces axes routiers.



Graphique 1 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 sur la commune de Djougou



Graphique 2 : Evolution de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 sur la commune de Djougou

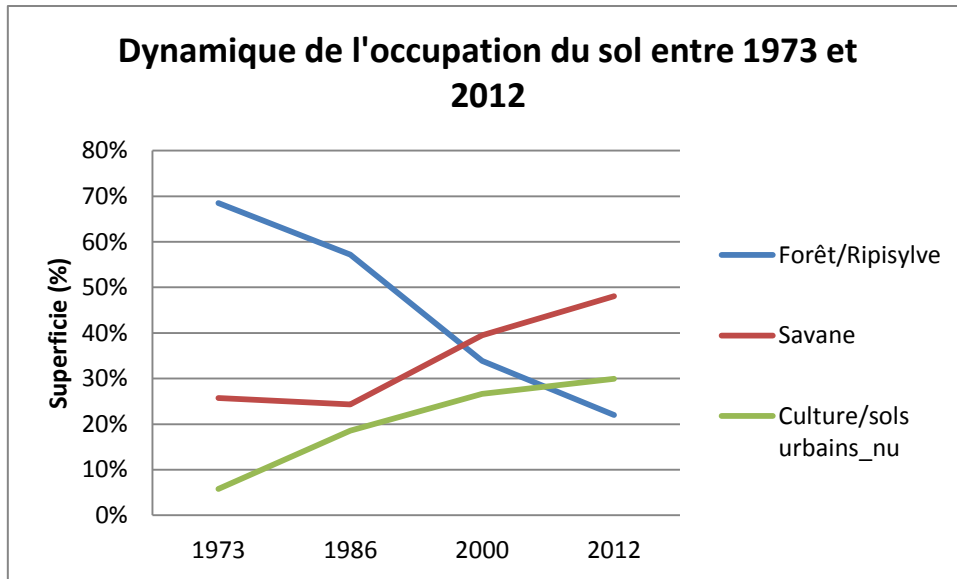
### 3.2.2. Au sein du bassin supérieur de l'Ouémé (1973-2012)

Globalement, la tendance observée à l'échelle de la commune de Djougou, se confirme à l'échelle du bassin supérieur de l'Ouémé (Graphique 3 ; Graphique 5 et Graphique 5) :

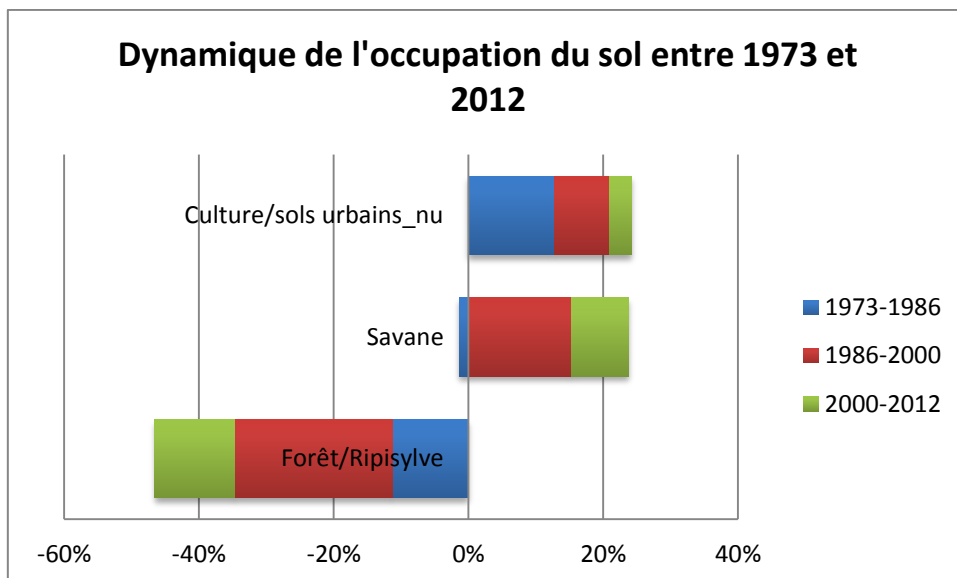
- Régression des formations végétales denses (- 47%)
- Progression des espaces de jachères, espaces cultivés et espaces urbanisés (+24%), des formations claires de types savane (+ 22%)

Tout comme précédemment, la déforestation est davantage marquée entre 1986 et 2000 (- 23%) qu'entre 1973 et 1986 (- 12 %) et qu'entre 2000 et 2012 (-11%).

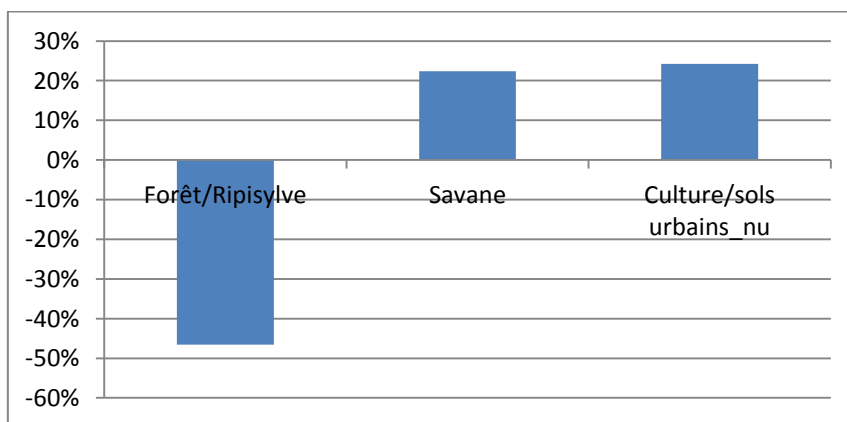
Par ailleurs, la même difficulté à discriminer entre des savanes arbustives et des jachères anciennes pour l'année 1986 peut être notée, mais dans des proportions moins élevées. Enfin, une augmentation générale des cultures peut être observée. Cependant, on peut noter un ralentissement progressif sur l'ensemble de la période.



Graphique 3 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé – Statistiques par année



Graphique 4: Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 - Statistiques entre 2 dates



Graphique 5 : Evolution de l'occupation du sol entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé

## 4. Analyse et interprétation

### 4.1. Cartographie des changements

#### 4.1.1. Matrice des changements paysagers entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou

L'image de 1973 présente un problème de géoréférencement se traduisant par un décalage de la classification par rapport à celles de 1986 et 2000, par conséquent cette date n'a pas été intégrée à l'analyse. La matrice des changements résultant du croisement entre la classification de 1986 et celle de 2000 permet d'identifier 3 types de dynamiques :

- Modification au sein de la végétation naturelle ou au sein des espaces anthropisés
- Conversion : changements d'une catégorie d'occupation des terres à une autre (OLOUKOI *et al.*, 2006 ; SARR, 2009)
- Non changement : classe non affectée par des modifications ou des conversions entre deux dates (SARR, 2009)

Tableau 6: Matrice de conversion entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou

Classification 2000	Classification de 1986			
	Forêt/ripisylve	Sol nu/sol urbain/inselberg	Culture/jachère	Savane
Non classé	0.001	0	0	0.023
Sol nu/sol urbain/inselberg	3.021	15.648	8.355	6.504
Forêt/ripisylve	53.388	7.625	5.992	15.622
Culture/jachère	9.869	27.43	46.583	22.284
Savane	33.721	49.297	39.07	55.567

zone de non changement    zone de conversion    zone de modification au sein de la végétation naturelle ou des espaces anthropisés

Plusieurs constats peuvent alors être faits (Tableau 6):

- *Pour la classe forêt et ripisylve* : On peut constater que près de 10% de cette classe a été converti en culture entre 1986 et 2000 et ce conformément aux statistiques d'évolution faites précédemment. 3% ont été convertis en sol nus, cela peut alors correspondre à des parcelles de forêt récemment défrichées ou bien être aussi le fruit d'une confusion entre la classe sol nu et culture. Par ailleurs, 33% ont été modifié en savane. Ceci peut aussi provenir d'une difficulté à discriminer les savanes arborées des espaces de forêt claire, surtout à cette période de l'année.
- *Pour la classe des sols nus* : seulement 15.6% des sols nus et espaces urbains en 1986 le sont toujours en 2000. La majorité d'entre eux sont classés en savane en 2000. Ce type de conversion n'est pas possible. L'explication alors la plus plausible est qu'une partie des sols nus/urbains classés comme tels en 1986 soient en fait des espaces de cultures qui se trouvent être des jachères anciennes en 2000. Dans ce cas, il s'agirait d'une confusion entre jachère ancienne et savane pour cette dernière date. Par ailleurs, la confusion entre les sols nus et les espaces de cultures est ici particulièrement visible puisque 27% des sols nus en 1986 ont été classés en culture en 2000.

- *Pour la classe des cultures* : 46% de la surface initiale se trouvent inchangés en 2000. Près de 40% sont convertis en savane, là encore certainement une confusion entre savane et jachère ancienne. De même on retrouve une confusion entre sol nu et espaces de culture.
- *Pour la classe savane* : 55% de la surface initiale se trouve inchangée en 2000. En revanche, 22% ont été convertis en culture, s'expliquant alors autant par une mise en culture des savanes qu'à la confusion entre les classes savane et jachère. 15% ont été modifiés en forêt.

Force est de constater, au terme de cette analyse de la matrice des changements, que si les classifications présentées indépendamment sont correctes, leur croisement montre de grosse incohérence dans les modalités de transition entre les dates. Ceci est dû en grande partie à une difficulté à discriminer entre certaines classes et à des confusions dans l'attribution des classes au sein des classifications. Certains changements apparaissent impossibles (transition d'espace urbanisé ou de culture vers des espaces de forêt). Par conséquent, la mise en place d'une cartographie dynamique de l'occupation du sol a eu pour but de tenter de remédier à cette difficulté (voir section 4.1.3).

#### 4.1.2. Matrice des changements paysagers entre 1973 et 2012 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé

Contrairement à précédemment, le croisement avec la date de 1973 a pu être réalisé ici, ce qui permet d'avoir les modalités de transition entre les dates pour l'ensemble de la période considérée. Pour pouvoir comparer l'ensemble des classifications Landsat à celle de MODIS, ces dernières ont été dégradées à la résolution spatiale de l'image MODIS (500 m). La méthode utilisée est celle du ré-échantillonnage au plus proche voisin.

- *Entre 1973 et 1986* (Tableau 7) : 10% des espaces de forêt ont été convertis en cultures et/ou en espaces urbanisés. Par ailleurs, près de 22% ont été modifiés en savane, en partie dus à la difficulté à discriminer entre savane arborée et forêt claire. Ceci confirme par la tendance inverse (43% des savanes en 1973 sont classées en forêt en 1986). Une mise en culture des savanes (22%) est également observée. Près de 20% et 18% des cultures en 1973 sont classées soit en forêt soit en savane en 1986, probablement en raison d'une difficulté à discriminer ces classes avec des jachères anciennes. Enfin, 51% des sols nus en 1973 sont classés en cultures en 1986, résultant de la confusion entre des sols nus et des cultures en cette période de l'année. A noter la conversion impossible entre sols nus en 1973 et forêt en 1986 (près de 18%). Là encore une erreur de classification, certainement des sols nus qui sont en fait des cultures en 1973 et correspondant à des jachères anciennes en 1986.
- *Entre 1986 et 2000* (Tableau 8) : 7% des espaces de forêt ont été convertis en culture et 22% modifiés en savane. Ce dernier constat est dû soit à une confusion entre savane et forêt, soit à une confusion entre jachère ancienne et savane, ce qui signifie qu'un certain pourcentage de savane en 1986 soit en fait des parcelles de cultures, probablement défrichées entre 1973 et 1986. On retrouve comme précédemment, la modification des savanes en forêt, et ce pour les mêmes raisons. De plus, pour les savanes, près de 16% d'entre elles ont été convertis en culture. On retrouve également la confusion entre jachère ancienne et savane puisque 22% des cultures en 1986 ont été classés en savane en 2000. De même, nous avons également la confusion entre sols nus et cultures. Ici, nous retrouvons la même conversion impossible entre sols nus et les classes de forêt ou savane et ce pour les mêmes raisons que précédemment, ainsi que la confusion entre sols nus et cultures (à hauteur de 16.36%).

- *Entre 2000 et 2012* (Tableau 9) : 32% des espaces savaniques en 2012, ont été classés en culture en 2000. Il s'agit alors essentiellement de jachères anciennes qui se confondent avec des savanes. Pour les forêts, on peut constater que 17% d'entre elles ont été mises en culture entre 2000 et 2012. Il faut noter la très forte confusion entre forêt et savane (à hauteur de 80%), ceci essentiellement dû à la résolution spatiale de 500 m qui rend beaucoup plus difficile la discrimination entre ces deux types d'occupation du sol. Enfin, 26% des savanes de 2000, ont été converties en cultures en 2012.
- *Entre 1973 et 2012* (Tableau 10) : Près de 48% des espaces de forêt ont été modifiés en savane entre 1973 et 2012 et 39 % convertis en culture et/ou sols urbains, sols nus. En revanche, on peut observer une transformation de la savane en culture à hauteur de 69%. La confusion entre les parcelles de jachères anciennes et la savane est ici bien notée puisque 50% des parcelles classées en culture en 1973 sont classées en savane en. Enfin, cette matrice de conversion entre les deux dates extrêmes permet d'atténuer les erreurs de classification et donc les conversions de types sols nus/forêt (seulement 2% des cultures/sols nus en 1973 ont été classés en forêt en 2012).

**Tableau 7 : Matrice de conversion entre 1973 et 1986 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé**

Classification de 1986	Classification de 1973			
	Forêt/Ripisylve	Savane	Culture/jachère	Sol nu/sol urbain/inselberg
Forêt/Ripisylve	65.28	43.59	19.88	18.39
Savane	22.17	31.21	18.46	3.34
Culture/jachère	10.38	22.21	57.15	51.24
Sol nu/sol urbain/inselberg	2.10	2.89	3.53	26.53
	Zone de non changement	Zone de conversion	Zone de modifications au sein de la végétation naturelle ou des espaces anthropisés	

**Tableau 8 : Matrice de conversion entre 1986 et 2000 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé**

Classification de 2000	Classification de 1986			
	Forêt/Ripisylve	Savane	Culture/jachère	Sol nu/sol urbain/inselberg
Forêt/Ripisylve	34.69	17.50	9.64	20.20
Savane	25.85	48.02	22.66	16.10
Culture/jachère	7.26	15.70	44.44	16.36
Sol nu/sol urbain/inselberg	3.36	3.87	10.97	12.10
	Zone de non changement	Zone de conversion	Zone de modifications au sein de la végétation naturelle ou des espaces anthropisés	

Tableau 9 : Matrice de conversion entre 2000 et 2012 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé

Classification 2012	Classification 2000		
	Culture/jachère/Sol urbain	Forêt / Ripisylve	Savane
Culture/jachère/Sol urbain	66%	17%	26%
Forêt / Ripisylve	2%	34%	24%
Savane	32%	80%	65%
	zone de modification au sein de la végétation naturelle ou des espaces anthropisés	zone de non changement	zone de conversion

Tableau 10 : Matrice de conversion entre 1973 et 2012 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé

Classification de 2012	Classification de 1973		
	Forêt/Ripisylve	Savane	Culture/jachère
Forêt/Ripisylve	13	2	27
Savane	48	28	50
Culture/jachère	39	69	23
	Zone de non changement	Zone de conversion	Zone de modifications au sein de la végétation naturelle ou des espaces anthropisés

La mise en place des matrices de conversion fait ressortir plusieurs difficultés en termes de classification :

- Les conversions observées sur la matrice entre 1973 et 2012 semblent plus cohérentes que pour les trois autres matrices. Cela permet de dire que des doutes peuvent être émis quant à la validation des classifications, notamment celle de 1986. En effet, c'est la seule date pour laquelle nous ne possédons pas de fichiers de validation. C'est donc la classification qui présente le moins de validité statistique.
- Une difficulté voire une impossibilité récurrente à discriminer pleinement les espaces de sols nus et les espaces de cultures (pour les classifications de 1973, 1986 et 2000) et ce en raison de l'utilisation d'images acquises en saison sèche.
- Une difficulté à discriminer entre les espaces de forêt, savane et jachères anciennes s'expliquant essentiellement par des caractéristiques phénologiques et spectrales propres à la végétation naturelle présentant des variations spatiales progressives et peu marquées entre les différents stades de régressions (BIGOT *et al.*, 2005).

#### 4.1.3. Cartographie dynamique des changements entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou

Pour obtenir la cartographie des dynamiques paysagères entre 1986 et 2000, un croisement des classifications a été opéré en les additionnant. Au préalable, un reclassement a été effectué pour l'année 1986 (classe 1 codée en 10, classe 2 codée en 20...classe 5 codée en 50 – Tableau 11). Ainsi, suite à l'addition, pour la classification résultante du croisement des deux dates, l'analyse des valeurs permet de déterminer quelle est la classe initiale (chiffre des dizaines) et la classe finale (chiffre des unités – Tableau 11). Puis, un nouveau reclassement a été effectué afin d'éliminer les classes dont les transitions sont impossibles (par exemple parcelles de sols nus qui se transforment en forêt). Pour ce faire, un masque pour chaque classe de 1986 a été fait puis appliqué à la classification de 2000. Ainsi cela permet de vérifier par exemple que des pixels de sol urbanisé en 1986 qui se transforment en

pixels de forêt en 2000 et étant situés au sein de la forêt de Béléfoungou sont manifestement des erreurs de classification. Ce genre de pixels a été réattribué à la classe forêt (Tableau 11).

**Tableau 11 : Exemple d'analyse mise en place pour le reclassement de la classification issue du croisement de 1986 et 2000**

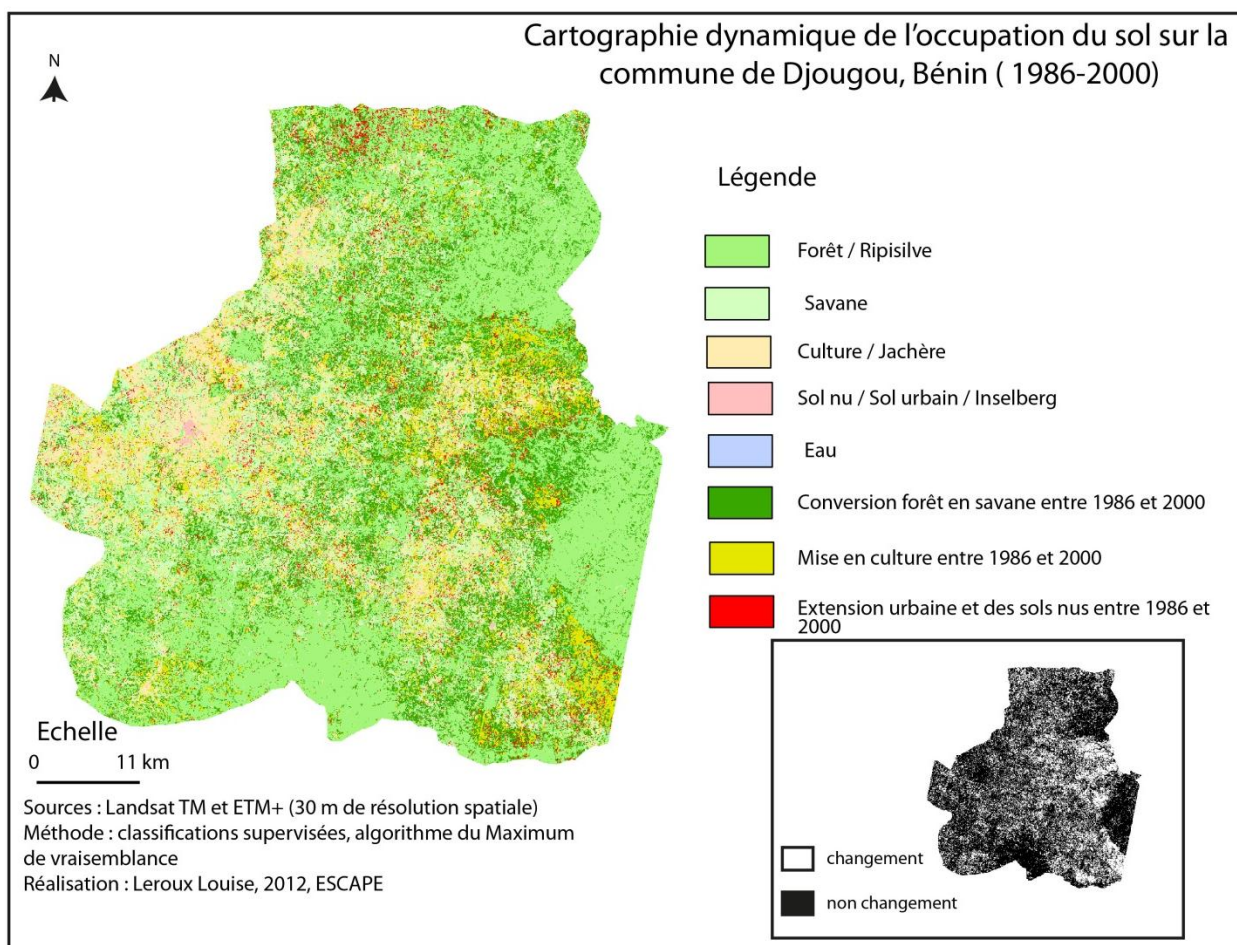
Classe en 1986	Classe en 2000	Résultante	Interprétation (reclassement)
10 (forêt)	3 (forêt)	13	Pas de changement pour la classe forêt
10 (forêt)	4 (culture)	14	Mise en culture de la forêt entre 1986 et 2000
30 (sols nus)	3 (forêt)	33	Erreur de classification, attribution à la classe forêt

Suite à l'analyse de cette cartographie (Figure 15), les grandes tendances précédentes sont observées :

- progression des cultures, avec un grignotage progressif sur les espaces de forêt, notamment sur la partie Est de la commune.

Pour la classe de conversion des forêts en savanes, deux hypothèses peuvent être émises :

- difficulté à discriminer entre les savanes arborées et la forêt (notamment la forêt claire) en cette période de l'année
- ces espaces de conversion peuvent aussi correspondre à des zones défrichées pour permettre leur mise en culture



**Figure 15 : Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou**

**Note** : Une cartographie des transitions incohérentes entre les deux dates a été faite et est présentée en **Annexe III (page 55-60)**. Celle-ci permet de faire une estimation des erreurs des pixels mal classés sur les classifications initiales. Est présentée également la méthodologie suivie.

#### 4.1.4. Cartographie dynamique des changements entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé

La même méthodologie que précédemment a été appliquée pour le croisement des classifications de 1973, 1986, 2000 et 2012 (Tableau 12). Ici, ce sont les classifications dégradées à la résolution de 500 m qui ont été utilisées. De plus, les classifications de 1973, 1986 et 2000 ont été reclassées, pour d'une part fusionner les classes de sols nus et cultures afin d'avoir le même nombre de classes que pour 2012. D'autre part, pour l'année 1973, un reclassement supplémentaire a été fait (classe 1 codée en 1000...classe 3 codée en 3000), puis le même reclassement a été utilisé pour l'année 1986 (100...300) et pour 2000 (10...30).

Tableau 12 : Exemple d'analyse mise en place pour le reclassement de la classification issue du croisement de 1973, 1986, 2000 et 2012

Classe en 1973	Classe en 1986	Classe en 2000	Classe en 2012	Résultante	Interprétation (reclassement)
2000 (forêt)	200 (forêt)	20 (forêt)	2 (forêt)	2222	Pas de changement pour la classe forêt
2000 (forêt)	100 (culture)	10 (culture)	1 (culture)	2111	Mise en culture de la forêt entre 1973 et 1986
3000 (savane)	100 (culture)	30 (savane)	3 (savane)	3133	Erreur de classification, attribution à la classe savane

Compte tenu du fait que la classification de 2000 se trouve réduite à cause de la présence d'un voile nuageux, la cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2012 a pu être mise en place que pour la partie commune aux quatre classifications (Figure 16).

Comme à l'échelle de la commune de Djougou, une progression des espaces de culture peut être observée à l'Ouest du bassin, ainsi qu'à l'Est et le long de l'axe routier qui va de Djougou vers Bétérou(+ 24% sur l'ensemble de la période, conformément à ce qui est observé sur le Graphique 5 - Tableau 13). Au vu de la cartographie, on peut également noter qu'à proximité de certains espaces de cultures (notamment l'axe routier), on trouve aussi des espaces de modification de forêt vers des espaces de savane. Aussi peut-on supposer que ce sont des espaces défrichés ou en cours de défrichement en vue d'une prochaine mise en culture.

Tableau 13 : Superficie représentée par chaque classe de changement sur la cartographie dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2012

Classe	Surface en %	Surface par type de changements (en%)
Cultures / Jachères / Sols urbains / Sols nus	6%	45%
Forêt / Ripisylve	17%	
Savane	22%	
Mise en culture entre 1973 et 1986	7%	24%
Mise en culture entre 1986 et 2000	8%	
Mise en culture entre 2000 et 2012	9%	
Modification de la forêt en savane entre 1973 et 1986	5%	30%
Modification de la forêt en savane entre 1986 et 2000	13%	
Modification de la forêt en savane entre 2000 et 2012	12%	

**Note :** la dégradation de la résolution spatiale des classifications Landsat entraîne forcément une perte d'informations. De ce fait, une cartographie dynamique des changements entre 1973 et 2000 a également été réalisée afin d'obtenir une cartographie sans dégradation de la résolution spatiale des classifications Landsat. Celle-ci est présentée en **Annexe IV page 61**.

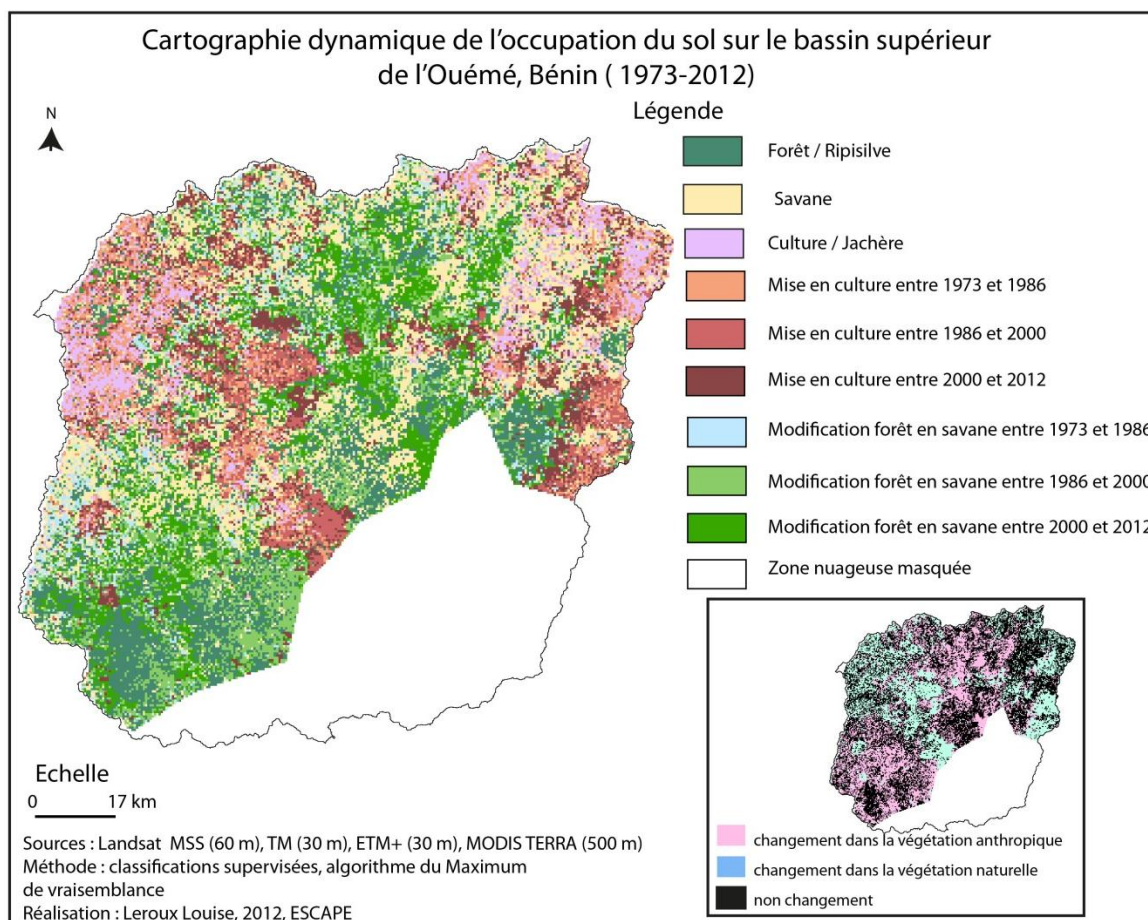


Figure 16 : Cartographie dynamique de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé entre 1973 et 2000

## 4.2. Analyse des trajectoires d'évolution entre 1973 et 2000 autour de la commune de Djougou

Partant du constat général d'une régression des formations végétales denses (forêt dense, forêt claire, forêt galerie, espace savanicole) au profit des espaces de cultures et de jachères, il convient d'analyser ces dynamiques au regard de facteurs structurants que sont notamment les villages mais également les routes. En effet, le réseau de routes et de pistes est un moyen d'organisation et d'appropriation de l'espace par les populations (MERLE ET GAUTIER, 2003).

### 4.2.1. Analyse en Composantes Principales entre 1973 et 2000 autour de la commune de Djougou

Les Analyses en Composantes Principales sont utilisées en télédétection sur des séries temporelles afin de résumer l'information portée par le jeu de données. Elle permet également de faire émerger des liaisons entre les variables. L'analyse permet aussi de caractériser les individus en fonction des variables et d'illustrer les liaisons existantes entre les variables à partir d'individus remarquables (CORNILLON *et al.*, 2010). L'utilisation des ACP en détection de changements a déjà montré toute son efficacité (HIROSAWA *et al.*, 1996). Ici, il s'agit de résumer l'information concernant l'évolution des différentes classes d'occupation du sol en fonction des dates. Ceci permet alors

d'analyser et de synthétiser les changements des couverts végétaux au cours du temps et de comprendre les dépendances entre les différentes variables. Dans notre cas, cela est également un moyen de s'affranchir du problème de géoréférencement de 1973 et d'intégrer cette dernière année dans l'analyse.

L'ACP a été menée à l'échelle de la commune de Djougou (Figure 17), les individus correspondent aux trois dates (1973, 1986, 2000) et les variables aux classes d'occupation du sol identifiées (Eau, sol nu/sol urbain/inselberg, culture/jachère, savane, forêt/ripisylve). Le jeu de données a été traité sous le logiciel R (version 2.15.1, package ade4).

D'après la Figure 17 et l'analyse des valeurs propres issues de l'ACP, il semble que la composante 1 représente les années qui vont s'opposer en fonction de la dynamique de la classe forêt (corrélation à -0.97) et celle de la classe culture (corrélation + 0.98). Les deux années qui sont les plus fortement corrélées à cette première composante sont 1973 et 2000. Ainsi, entre 1973 et 2000, une régression des forêts au profit des cultures est observée. La composante 2 elle est plus représentative de la situation en 1986 sur la commune de Djougou et témoigne de la transition entre 1973 et 2000. En effet, la classe des sols nus est corrélée positivement avec la composante 1 (signe d'une augmentation entre 1973 et 2000) mais négativement avec la composante 2, ainsi l'augmentation des sols nus se fait essentiellement entre 1973 et 1986 alors qu'au contraire, l'augmentation des savanes est plus marquée entre 1986 et 2000.

L'ACP a été mise en place sur un jeu de données trop restreint pour que sa valeur statistique prenne un sens. Cependant, elle permet tout de même de faire ressortir les évolutions générales constatées sur le site d'étude. Il convient par ailleurs, d'analyser plus en détails les dynamiques de l'occupation du sol sur la commune de Djougou en fonction du réseau de routes/pistes et de la ville de Djougou.

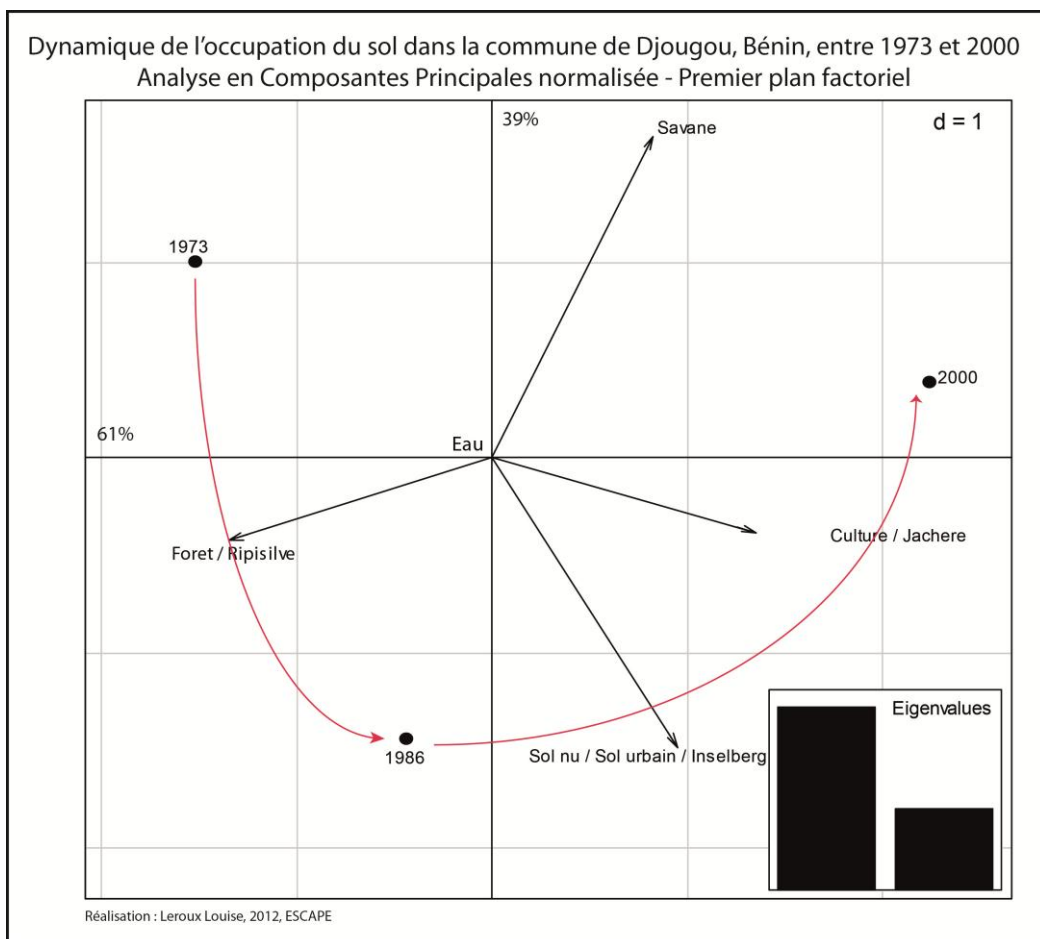


Figure 17 : Dynamique de l'occupation du sol sur la commune de Djougou entre 1973 et 2000 d'après une Analyse en Composantes Principales normalisée

#### 4.2.2. Les dynamiques de l'occupation du sol sur la commune de Djougou entre 1973 et 2000 : l'influence de la ville de Djougou et du réseau de routes

##### 4.2.2.1. Création des entités villes et réseau de routes

La création de ces deux entités s'est faite par digitalisation sous le logiciel Quantum GIS à partir d'un fond de carte Google Satellite©. Pour ce faire, le plugin *OpenLayers* a été utilisé. Pour mettre en place les analyses en fonction du réseau de routes et de la ville de Djougou, trois zones tampons ont été créées autour de chaque entité (Tableau 14):

Tableau 14 : Détails des zones tampon créées autour de la ville de Djougou et du réseau de routes

Entité	Distance de la zone de tampon	Superficie / Superficie totale de la commune
Ville de Djougou	3 km	1.63 %
	5 km	1.88 %
	10 km	7.66 %
Routes	1 km	12.19%
	3 km	24.28 %
	5 km	23.70 %

Puis, pour chaque classification, des statistiques de répartition des classes d'occupation du sol au sein des zones tampons ont été calculées.

#### 4.2.2.2. *La dynamique de l'occupation du sol en fonction de l'éloignement à la ville de Djougou*

La Figure 18 représente l'ensemble de la zone contenue au sein du buffer de 10 km autour de la ville de Djougou.

La Figure 19 montre que globalement pour les trois dates deux tendances peuvent être observées :

- Une diminution des surfaces cultivées avec l'éloignement à la ville de Djougou
- Une augmentation des surfaces de végétation naturelle ou semi-naturelle (forêt et savane) avec l'éloignement à la ville de Djougou

Par ailleurs, l'analyse date à date montre que plus on avance dans le temps, plus on peut voir une expansion des espaces cultivés sur des zones éloignées de la ville. En effet la proportion de terres cultivées à 10 km de la ville était de 16% en 1973, 23% en 1986 et 33% en 2000. La tendance inverse s'observe pour la végétation naturelle ou semi-naturelle (83% en 1973, 66% en 1986 et 59% en 2000 à 10 km du centre de la ville de Djougou). On observe alors une véritable progression des espaces de cultures vers les forêts à partir du centre de la ville de Djougou.

A une distance de 3 km de la ville, une intensification des pratiques agricoles est aussi à noter. On peut d'ailleurs, au vu des résultats des classifications, supposer que parmi les 29% de savanes en 2000, se trouve une certaine proportion de jachères anciennes. Pour la végétation naturelle, nous avons également une régression au cours du temps. Les espaces qui sont conservés correspondent alors aux forêts sacrées que l'on peut trouver au Sud de Djougou.

Enfin, dans la bande des 5 km autour de la ville de Djougou, il semble que les pratiques agricoles soient stabilisées dans le temps (à noter le cas particulier de 1986, avec certainement la confusion entre savane et jachère).

Au final, la ville de Djougou, se présente comme un véritable pôle d'expansion des surfaces anthropiques avec trois modes d'appropriation de l'espace par les populations :

- Autour de Djougou (3 km), espaces où les pressions anthropiques sont croissantes dans le temps (intensification des cultures, pressions sur la végétation sacrée)
- Dans une bande 5 km, zone qui semble depuis un certain temps consacrée à l'agriculture
- Dans une bande de 10km, zone récente d'expansion des cultures, avec fortes pressions sur les formations végétales denses, lieu de déforestation

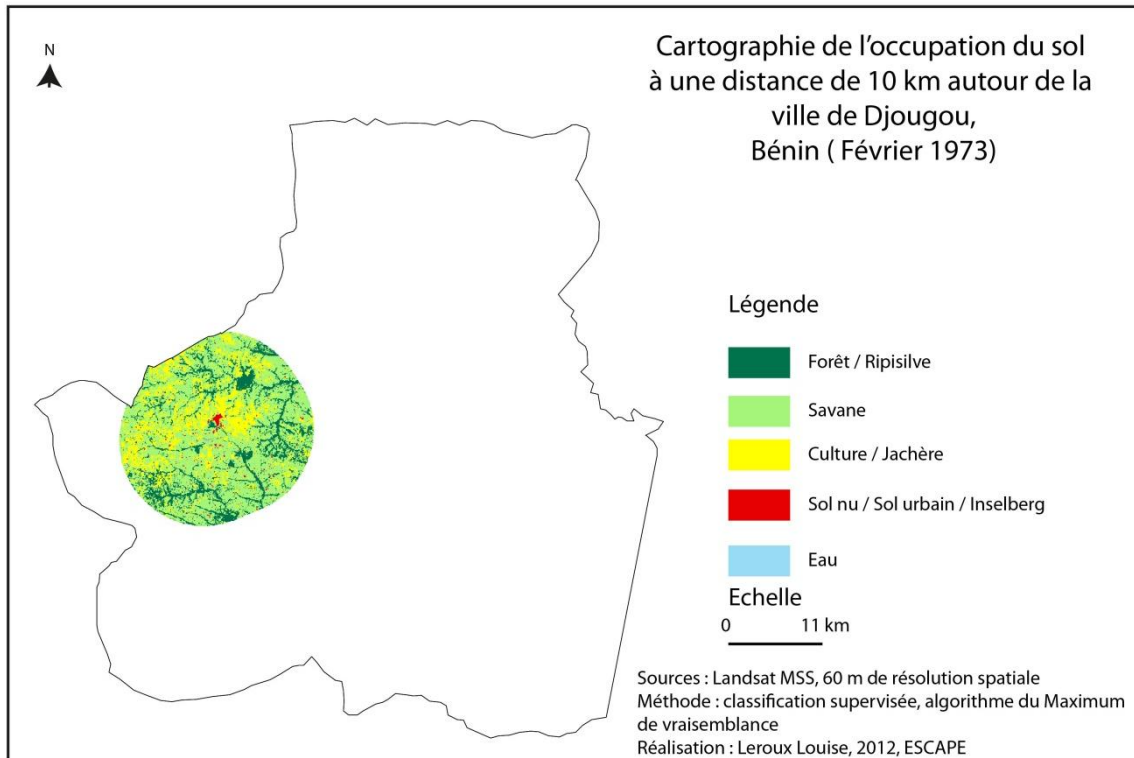


Figure 18 : Cartographie de l'occupation du sol à une distance de 10 km autour de la ville de Djougou - Exemple de l'année 1973

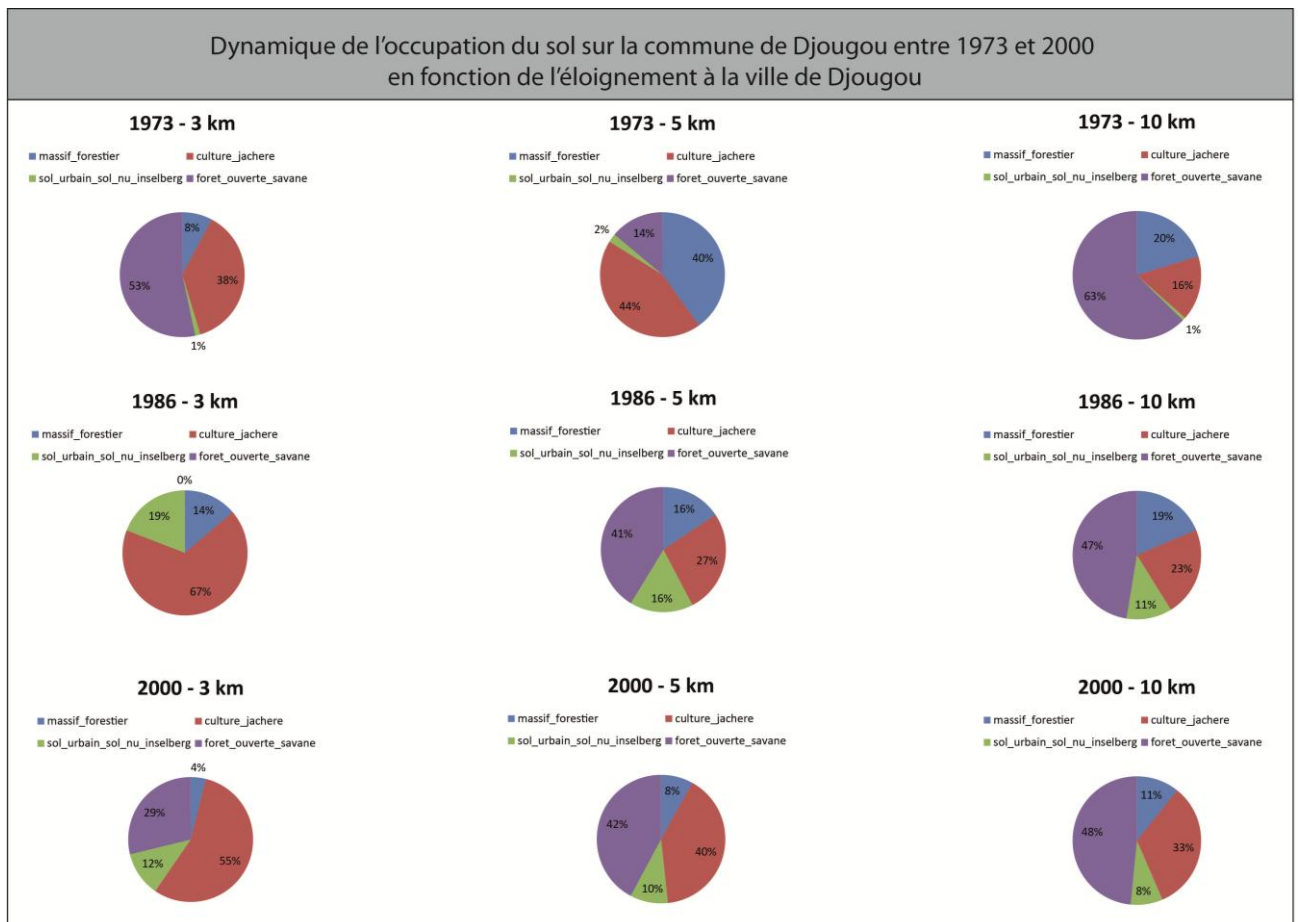


Figure 19 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 en fonction de l'éloignement à la ville de Djougou

#### 4.2.2.3. *La dynamique de l'occupation du sol en fonction de l'éloignement au réseau de routes*

Comme précédemment, la Figure 21 montre les deux mêmes tendances, à savoir une augmentation de la végétation naturelle et une régression des espaces anthropisés avec l'éloignement au réseau de routes et de pistes. La Figure 20 présente la cartographie des espaces concernés par le buffer de 5 km autour du réseau de routes et de pistes principales.

Si l'on prend en considération une bande de 1 km de part et d'autre du réseau de routes, on peut noter que la végétation naturelle ou semi-naturelle représentait près de 85% de la superficie, et 14% pour les espaces cultivés. En revanche, en 2000, la végétation naturelle ne représente plus que 55% de la superficie contre 35% pour les cultures. Il faut noter aussi que les espaces urbanisés représentent eux 10% en 2000 alors qu'ils comptaient pour à peine 1% en 1973. Ce phénomène s'explique alors par le fait qu'en 1973, un certain nombre de routes n'étaient pas encore construites. La mise en place de celles-ci, ainsi que la forte croissance démographique ont contribué à l'expansion et à la densification des surfaces urbanisées.

A une distance de 3 km du réseau de routes, les mêmes tendances sont observées, mais dans des proportions moindres. Il faut noter la forte présence de sols urbains et sols nus en 1973, certainement due à une confusion de cette classe avec la classe des cultures.

Enfin à une distance de 5 km, deux tendances peuvent être remarquées. D'une part, entre 1973 et 2000, nous avons une mise en culture importante de cet espace (5% en 1973, 11% en 1986 et 21% en 2000). D'autre part, au sein de la végétation naturelle, nous avons également une modification notable puisque la forêt représentait 54% de la superficie contre 42% pour les savanes en 1973, tandis qu'en 2000, nous sommes à 26% pour la première et 48% pour la seconde. Ceci signifie qu'une partie de la forêt a été défrichée pour pouvoir la mise en culture de nouveaux espaces ou bien que cela correspondent à des espaces déjà mis en culture (jachères anciennes par exemple).

La forte concentration des cultures et des sols anthropisés à proximité des routes montre que ces dernières sont bien un facteur d'appropriation de l'espace par les populations. La création de ces routes entraîne alors dans premier temps des coupes importantes des forêts pour leur implantation, puis elles sont le point de départ de défrichements pour la mise en culture de nouveaux espaces. Le bois extrait peut ensuite être acheminés et vendus vers les villes et villages alentours comme bois de chauffage, de construction ou pour la création de charbon.

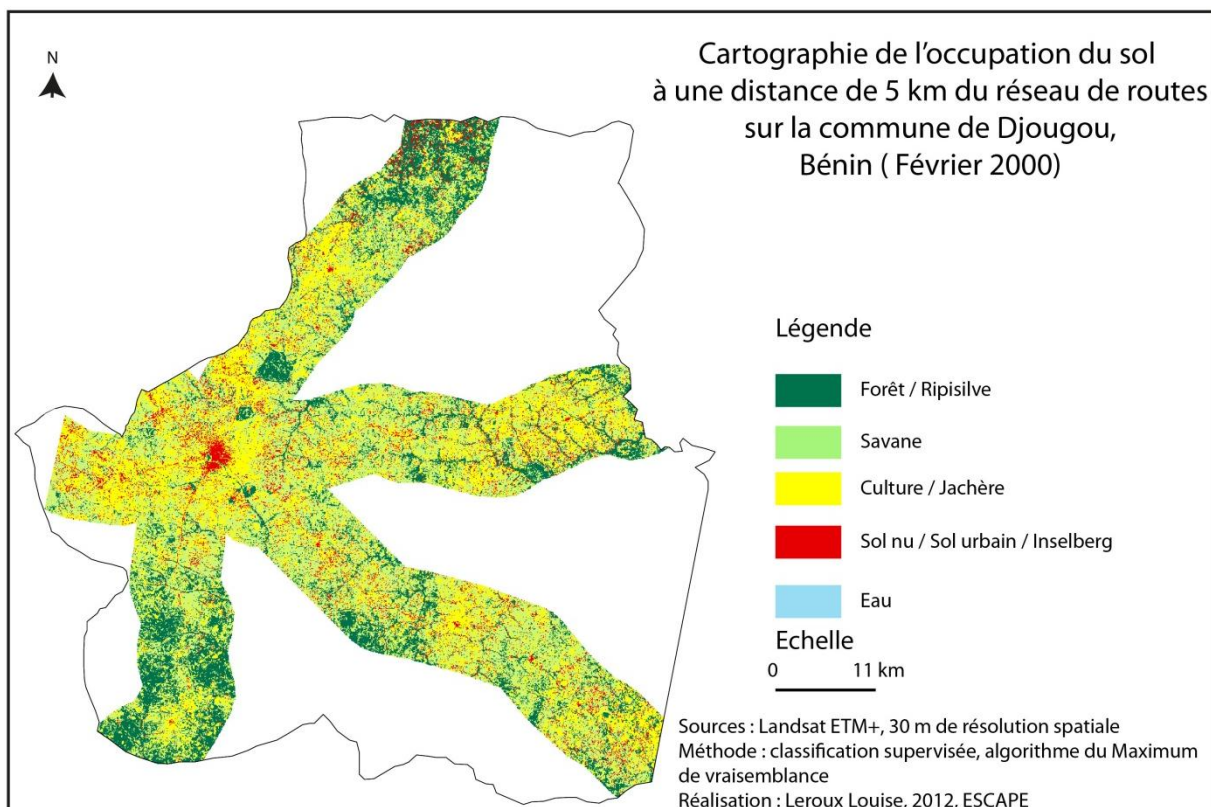


Figure 20 : Cartographie de l'occupation du sol à une distance de 5km autour du réseau de routes - Exemple de l'année 2000

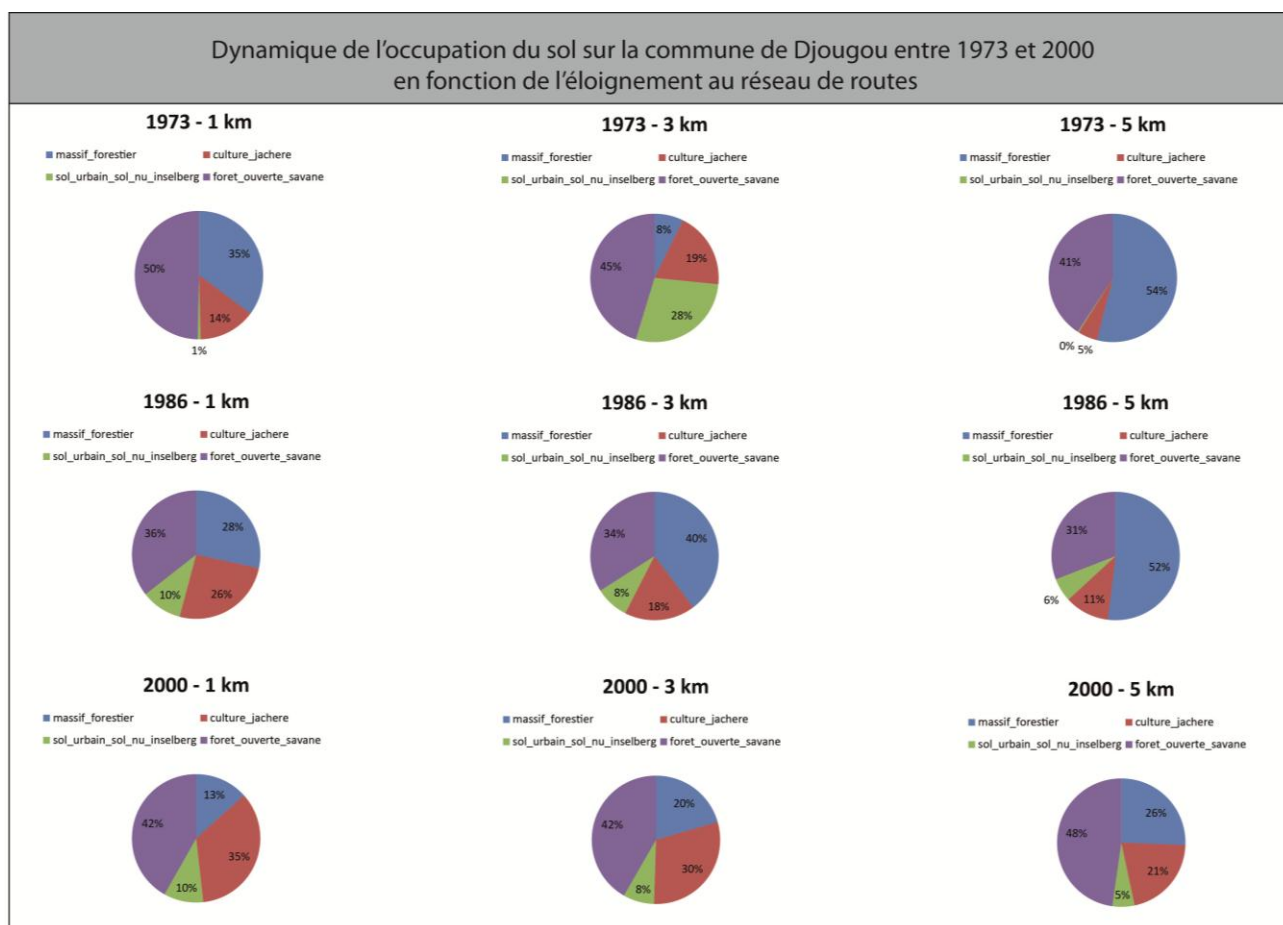


Figure 21 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 en fonction de l'éloignement au réseau de routes

## 5. Discussion et conclusion

L'Afrique de l'Ouest connaît depuis les dernières décennies une forte croissance démographique. Conjointement à ce phénomène, les modifications climatiques en cours entraînent également de profonds bouleversements environnementaux. Aussi, dans ce contexte, les pressions exercées sur les ressources naturelles sont de plus en plus grandes, accentuées notamment par une mise en culture rapide des espaces de végétation naturelle pour pouvoir subvenir aux besoins alimentaires d'une population grandissante. Il convient donc de pouvoir estimer les variations spatio-temporelles de l'occupation du sol. L'utilisation de la télédétection est alors un outil pouvant être utile pour le suivi des couverts végétaux (SARR, 2009).

Dans ce cadre, l'objectif de ce travail était de mettre en place une analyse diachronique de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé entre 1973 et 2012 afin de quantifier l'impact des pressions anthropiques sur les paysages béninois. Pour ce faire, des images issues du satellite à haute résolution spatiale Landsat ont été utilisées. L'exemple de la commune de Djougou a été pris (1973-2000). L'utilisation d'une image de 2012 à moyenne résolution spatiale MODIS a également permis de compléter l'analyse sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé.

Les tendances observées à l'échelle de la commune de Djougou, comme à celle du bassin supérieur de l'Ouémé dans son ensemble sont semblables. Les paysages ont subi, depuis le début des années 1970, d'importantes modifications. Une expansion des espaces consacrés à la culture et des espaces urbains peut être observée. Celle-ci se fait alors au départ des centres urbains et villageois mais également le long des axes de communication principaux (réseau de routes, réseau de pistes). Par ailleurs, ceci se fait au dépend des espaces de végétations denses (forêt dense et claire, forêt galerie, forêt classée) qui subissent une forte régression. L'utilisation de ces espaces permet de bénéficier de nouvelles terres fertiles et donc d'augmenter les productions agricoles.

La méthode utilisée pour analyser les modalités de transition entre les différentes dates est basée sur les traitements post-classification. Cette méthode, bien que simple à mettre en œuvre, entraîne cependant la multiplication des erreurs propres à chaque classification. Cependant, c'est aussi une méthode robuste par rapport aux variations des conditions des images (LEFEBVRE *et al.*, 2001). De ce fait, dans le cadre de notre étude, elle a permis de mener une analyse sur des images provenant de capteurs différents.

Les cartographies de l'occupation du sol ont été mise en place à partir d'images Landsat. Dans notre cas cela pose plusieurs problèmes. D'une part, en raison d'une forte nébulosité pendant la période des pluies, cela nous contraint à utiliser des images acquises pendant la période sèche. Par conséquent, la discrimination entre certaines parcelles de cultures et des sols nus a été rendu très difficile. D'autre part, si les images Landsat présentent une haute résolution spatiale, dans un contexte où les transitions paysagères se font de façon graduelle et par mosaïquage, elles ne permettent pas de pouvoir faire ressortir ce niveau de détails. En revanche, leur utilisation a tout de même permis de pouvoir donner une vision générale de l'évolution de l'occupation du sol. Pour avoir des informations beaucoup plus précises et détaillées sur certains espaces clés (notamment le long des fronts de déforestation), il est alors nécessaire d'utiliser des images à très haute résolution spatiale comme SPOT. Les images MODIS ont permis d'étendre les classifications à la date la plus récente, cependant la résolution spatiale de 500 m permet de discriminer que les grands éléments paysagers. De plus, son intégration dans l'analyse entraîne également une dégradation de l'information obtenue avec les images Landsat. Enfin, l'utilisation de la télédétection est un outil performant pour mettre en place une cartographie du paysage. Cependant, comme nous avons pu le constater à plusieurs reprises au cours de ce travail, si les classifications résultantes sont cohérentes statistiquement (comme c'est notre cas), cela ne l'est pas toujours géographiquement (BIGOT *et al.*, 2005).

Les phénomènes de déforestation à l'œuvre dans le bassin supérieur de l'Ouémé représentent un exemple de ce qui se passe sur l'ensemble du Bénin. Si cela permet de mettre en cultures de nouveaux espaces ou bien d'augmenter les activités liées au commerce du bois, les conséquences sur les écosystèmes n'en sont pas moins importantes. Ces espaces déboisés se trouvent à nus, les sols ne sont donc plus protégés des intempéries et perdent peu à peu de leur fertilité à cause de lessivage. De même, les parcelles de culture à force de surexploitation deviennent de moins en moins productives et les rendements agricoles diminuent. Au final, les crises alimentaires persistent. Au-delà d'une expansion des terres agricoles, pour améliorer la sécurité alimentaire au Bénin, et plus largement en Afrique, c'est vers une meilleure gestion des ressources qu'il faut tendre. Par ailleurs, la déforestation entraîne également une perte de la biodiversité en raison de la destruction de nombreux habitats naturels. En ce sens, un suivi régulier de l'évolution de l'occupation du sol comme ce qui a été fait au sein de ce travail, montre que cette dernière est une variable fondamentale à la gestion de l'environnement et à la compréhension de son fonctionnement.

# Bibliographie

- AMAN A., FOFANA S., KEITA M., 2001 : Télédétection en milieu de savane : problème de la nomenclature lié au changement d'échelle spatiale. *Télédétection*. Vol 2(2).pp.91-101.
- BARDUCCI A., GUZZY D., MARCOINNI P., PIPPI I., 2009: Aerospace wetland monitoring by hyperspectral imaging sensors: A case study in the coastal zone of San Rossore Natural Park. *Journal of environmental management*. Vol 90.pp.2278-2286.
- BIGOT S., ZIN I., DIEDHIOU A., 2005 : Apports de données de HRV de SPOT pour l'étude des variations phénologiques dans le bassin de l'Ouémé (Bénin). *Télédétection*. Vol 4(4).pp.339-353.
- BOUGHERARA A., 2010 : Identification et suivi des paysages et de leur biodiversité dans la wilaya d'El Tarf (Algérie) à partir des images Landsat, Spot et Aster. *Revue Télédétection*. Vol9(3-4-).pp.225-243.
- CORNILLON P.A., GUYADER A., HUSSON F., JEGOU N., JOSSE J., KLOAREG M., MATZNER-LOBER E., ROUVIERE L., 2010: Statistiques avec R (2ème édition augmentée). Presses Universitaires de Rennes. 274 pages.
- DAVRANCHE A., 2008: *Suivi de la gestion des zones humides camarguaises par télédétection en référence à leur intérêt avifaunistique*. Ecole doctorale : Espaces, cultures, sociétés. 235 pages.
- DJOUFACK-MANETSA V., 2011: *Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI*. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Géographie (option Climatologie) de l'Université de Bourgogne et de l'Université de Yaoundé. 303 pages.
- ENONZAN F.B., 2010 : *Utilisation de la télédétection et des SIG dans la gestion durable des aires protégées : cas des forêts classées de Dogo-Ketou au Bénin*. Mémoire pour l'obtention du DESS en ligne [url] [http://www.memoireonline.com/06/11/4575/m\\_Utilisation-de-la-teledetection-et-des-SIG-dans-la-gestion-durable-des-aires-protégees--cas-des11.html](http://www.memoireonline.com/06/11/4575/m_Utilisation-de-la-teledetection-et-des-SIG-dans-la-gestion-durable-des-aires-protégees--cas-des11.html)
- HIROSAWA Y., MARSH S.E., KLIMAN D.H., 1996: Application of Standardized Principal Component Analysis to Land-Cover Characterization Using Multitemporal AVHRR Data. *Remote Sensing Environment*. Vol 58.pp.267-281.
- HOUNTONDJI I.C.H., 2008 : *Dynamiques environnementales en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'université de Liège, Belgique. 153 p.
- JUSTICE C.O., VERMOTÉ E., TOWNSHEND J.R.G., DEFRIERS R., ROY D.P., HALL D.K., SALOMONSON V.V., PRIVETTE J.L., RIGGS G., STRALER A., LUTCH W., MYNEMI B.R., KNYAZIKHIN Y., RUNNING S.W., NEMANI R.R., WAN Z., HUETE A.R., VAN LEEUWEN W., WOLFE R.E., GIGLIO L., MULLER J-P., LEWIS P., BARNSLEY M., 1998 : The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. Vol 36(4).pp.1228-1249.
- KAMAGATE B., 2006 : *Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute vallée de L'Ouémé)*. Thèse pour obtenir le titre de Docteur de l'université Montpellier II, France. 320 p.
- KOJAME K.F., BERNIER M., GONE D.L., SALEY M.B., LEFEBVRE R., SORO N., KOUDOU A., 2007 : Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Revue de Télédétection*. Vol 7(1-2-3-4).pp.217-235.
- LEFEBVRE A., CORPETTI T., HUBERT-MOY L., 2011: Ondelettes et théorie des évidences pour la classification orientée-objet- Caractérisation et changement des dynamiques d'occupation des sols de la métropole de Rennes. *Revue Internationale de Géomatique*. Vol21.pp.297-325.
- MERLE C., GAUTIER D., 2003 : Prélèvements de bois de feu dans les villages du Sud de Maroua (Cameroun) : Une modélisation. *Mappemonde*.Vol 69(1). 7 pages.
- MYNEMI R.B., HOFFMAN S., KNYAZIKHIN Y., PRIVETTE J.L., GLASSY J., TIAN Y., WANG Y., SONG X., ZHANG. Y., SMITH G..R., LOTSCH A., FRIEDL M., MORISSETTE J.T., VOTAVA P., NEMANI R.R., RUNNING S.W., 2002 : Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. Vol 83.pp.214-231.
- OLOUKOI J., MAMA V.J., AGBO F.B., 2006 : Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin. *Télédétection*. Vol 6(4).pp.305-323.
- OSZWALD J., LEFEBVRE A., ARNAULT DE SARTRE X., THALES M., GOND V., 2010 : Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de maçaranduba (para, Brésil) entre 1997 et 2006. *Revue Télédétection*. Vol 9(2). pp. 97-111.
- PENNEC A., GOND V., SABATIER D., 2011: Tropical forest phenology in French Guiana from MODIS time series. *Remote Sensing Letters*. Vol 2(4).pp.337-345.
- PONTIUS R.G.Jr., 2000 : Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol66(8).pp.1011-1016.

RICHARDS J.A., 1999 : Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, Berlin. 240 p.

ROBIN M., 2002. Télédétection, Des satellites au SIG. Une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique. Nathan Université. 318 p.

SARR M.A., 2009 : Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, article 472, mis en ligne le 07 octobre 2009, consulté le 30 octobre 2012. URL : <http://cybergeo.revues.org/22707> ; DOI : 10.4000/cybergeo.22707

SKUPINSKI G., BINHTRAN D., WEBER C., 2009 : Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, article 439, mis en ligne le 12 mars 2009, consulté le 30 octobre 2012. URL : <http://cybergeo.revues.org/21995> ; DOI : 10.4000/cybergeo.21995

TOSSA A.Y., TOUNOHEWA A., 2009 : *Profil de l'Ouémé et caractérisation des sites pilotes (Analyse des données)*. Rapport du projet de renforcement des capacités nationales de suivi des ressources en eau, axe sur la gestion de l'eau agricole. 64 p.

VARADO N., 2004 : *Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France. 321 p.

WEZEL A., BOHLINGER B., BÖCKER R., date? : Zones de végétation au Niger et au Bénin – zonation présente et passée. Article en ligne [url] [https://www.uni-hohenheim.de/atlas308/a\\_overview/a3\\_1/html/french/a31ntext\\_fr.htm](https://www.uni-hohenheim.de/atlas308/a_overview/a3_1/html/french/a31ntext_fr.htm)

WHITE F., 1983: The vegetation of Africa. UNESCO, Paris. 356 p.

## Liste des Figures

Figure 1: Localisation du bassin supérieur de l'Ouémé et de la commune de Djougou	4
Figure 2 : Modèle Numérique de Terrain (ASTER GDEM) à 30 m de résolution spatiale	5
Figure 3 : Localisation des photographies aériennes de la mission IGN de 1975 sur la commune Djougou	9
Figure 4 : Méthodologie mise en œuvre pour la mise en forme et l'exploitation des points de contrôle terrain de la mission de Mars 2011	13
Figure 5 : Exemple de reconnaissance spectrale d'une ripisylve par comparaison avec une image Google Earth©	14
Figure 6 : Schéma méthodologique pour la mise en place de la cartographie diachronique de la dynamique paysagère sur la commune de Djougou	16
Figure 7: Comparaison des signatures spectrales des classes cultures/jachères et sols nus/sols urbains/inselbergs	17
Figure 8 : Histogramme de la répartition des valeurs spectrales sur la bande du PIR des classes de culture/jachère et de sols nus/sols urbains/inselbergs	17
Figure 9 : Exemple d'une imprécision sur la classification IMPETUS de 2000 par comparaison avec une image Google Earth© de 2004	18
Figure 10 : Histogramme de la répartition des valeurs spectrales sur la bande du PIR des classes de forêt/ripisylve et de savane	20
Figure 11 : Cartographie de l'occupation du sol autour de la commune de Bétérou en 2010	22
Figure 12 : Cartographie de l'occupation du sol sur la commune de Djougou en 1973, 1986 et 2000	23
Figure 13 : Dynamique paysagère, l'exemple le long de l'axe routier menant à Bétérou	23
Figure 14 : Cartographie de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé en 1973, 1986, 2000 et 2012	24
Figure 15 : Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou	32
Figure 16 : Cartographie dynamique de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé entre 1973 et 2000	34
Figure 17 : Dynamique de l'occupation du sol sur la commune de Djougou entre 1973 et 2000 d'après une Analyse en Composantes Principales normalisée	36
Figure 18 : Cartographie de l'occupation du sol à une distance de 10 km autour de la ville de Djougou - Exemple de l'année 1973	38
Figure 19 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 en fonction de l'éloignement à la ville de Djougou	38
Figure 20 : Cartographie de l'occupation du sol à une distance de 5km autour du réseau de routes - Exemple de l'année 2000	40
Figure 21 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 en fonction de l'éloignement au réseau de routes	40

## Liste des Graphiques

Graphique 1 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 sur la commune de Djougou	25
Graphique 2 : Evolution de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 sur la commune de Djougou	25
Graphique 3 : Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé – Statistiques par année	26
Graphique 4: Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 - Statistiques entre 2 dates	26
Graphique 5 : Evolution de l'occupation du sol entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé	26

## Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs Landsat MSS, TM et ETM+</i>	7
<i>Tableau 2 : Caractéristiques du capteur MODIS TERRA</i>	8
<i>Tableau 3 : Identification et définition des classes d'occupation du sol présentes sur la commune de Djougou</i>	10
<i>Tableau 4 : Tableau récapitulatif de la précision des classifications sur la commune de Djougou</i>	19
<i>Tableau 5 : Tableau récapitulatif de la précision des classifications sur le bassin supérieur de l'Ouémé</i>	21
<i>Tableau 6: Matrice de conversion entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou</i>	27
<i>Tableau 7 : Matrice de conversion entre 1973 et 1986 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé</i>	29
<i>Tableau 8 : Matrice de conversion entre 1986 et 2000 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé</i>	29
<i>Tableau 9 : Matrice de conversion entre 2000 et 2012 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé</i>	30
<i>Tableau 10 : Matrice de conversion entre 1973 et 2012 sur l'ensemble du bassin supérieur de l'Ouémé</i>	30
<i>Tableau 11 : Exemple d'analyse mise en place pour le reclassement de la classification issue du croisement de 1986 et 2000</i>	31
<i>Tableau 12 : Exemple d'analyse mise en place pour le reclassement de la classification issue du croisement de 1973, 1986, 2000 et 2012</i>	33
<i>Tableau 13 : Superficie représentée par chaque classe de changement sur la cartographie dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2012</i>	33
<i>Tableau 14 : Détails des zones tampon créées autour de la ville de Djougou et du réseau de routes</i>	36

## Annexe

# Annexe I

## Test de séparabilité des classes avant la mise en place des classifications (Jeffries-Matusita et Divergence transformée)

- 2010 – Bétérou

Eau [Red] 125 points:

arecage [Green] 514 points: (1.99932636 2.00000000)  
Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points: (2.00000000 2.00000000)  
Cultures arborees [Yellow] 340 points: (2.00000000 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points: (1.99886452 2.00000000)  
Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points: (1.99930987 2.00000000)  
Ombres [Maroon] 290 points: (1.95069591 1.99858323)  
Savane [Sea Green] 2553 points: (1.99999995 2.00000000)

arecage [Green] 514 points:

Eau [Red] 125 points: (1.99932636 2.00000000)  
Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points: (1.99799148 1.99999997)  
Cultures arborees [Yellow] 340 points: (1.99999459 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points: (1.99939816 2.00000000)  
Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points: (1.86718262 1.98826007)  
Ombres [Maroon] 290 points: (1.95322522 1.99349213)  
Savane [Sea Green] 2553 points: (1.99899471 2.00000000)

Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points:

Eau [Red] 125 points: (2.00000000 2.00000000)  
arecage [Green] 514 points: (1.99799148 1.99999997)  
Cultures arborees [Yellow] 340 points: (1.99991919 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points: (1.99999869 2.00000000)  
Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points: (1.71660261 1.94618538)  
Ombres [Maroon] 290 points: (1.99999834 2.00000000)  
Savane [Sea Green] 2553 points: (1.99057083 2.00000000)

Cultures arborees [Yellow] 340 points:

Eau [Red] 125 points: (2.00000000 2.00000000)  
arecage [Green] 514 points: (1.99999459 2.00000000)  
Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points: (1.99991919 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points: (1.92328439 1.99679594)  
Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points: (1.99947987 2.00000000)  
Ombres [Maroon] 290 points: (1.99999999 2.00000000)  
Savane [Sea Green] 2553 points: (1.85186541 1.99495419)

Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points:

Eau [Red] 125 points: (1.99886452 2.00000000)  
arecage [Green] 514 points: (1.99939816 2.00000000)  
Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points: (1.99999869 2.00000000)  
Cultures arborees [Yellow] 340 points: (1.92328439 1.99679594)  
Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points: (1.99883065 2.00000000)  
Ombres [Maroon] 290 points: (1.99549935 2.00000000)  
Savane [Sea Green] 2553 points: (1.86531794 1.99994341)

Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points:

Eau [Red] 125 points: (1.99930987 2.00000000)  
arecage [Green] 514 points: (1.86718262 1.98826007)  
Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points: (1.71660261 1.94618538)  
Cultures arborees [Yellow] 340 points: (1.99947987 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points: (1.99883065 2.00000000)  
Ombres [Maroon] 290 points: (1.95789717 1.99998890)  
Savane [Sea Green] 2553 points: (1.96874536 2.00000000)

Ombres [Maroon] 290 points:

Eau [Red] 125 points: (1.95069591 1.99858323)  
arecage [Green] 514 points: (1.95322522 1.99349213)  
Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points: (1.99999834 2.00000000)

Cultures arborees [Yellow] 340 points: (1.99999999 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points: (1.99549935 2.00000000)  
Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points: (1.95789717 1.99998890)  
Savane [Sea Green] 2553 points: (1.99999246 2.00000000)

Savane [Sea Green] 2553 points:  
Eau [Red] 125 points: (1.99999995 2.00000000)  
arecage [Green] 514 points: (1.99899471 2.00000000)  
Cultures/Jacheres [Blue] 1459 points: (1.99057083 2.00000000)  
Cultures arborees [Yellow] 340 points: (1.85186541 1.99495419)  
Foret/Ripisilve [Cyan] 1619 points: (1.86531794 1.99994341)  
Sol nu/Sol urbain/Inselberg [Magenta] 1124 points: (1.96874536 2.00000000)  
Ombres [Maroon] 290 points: (1.99999246 2.00000000)

- 1973 – Commune de Djougou

Foret/ripisilve [Red] 17522 points:  
Culture/Jachere [Green] 667 points: (1.98321586 1.99999793)  
Sol urbain/sol nu/inselberg [Blue] 385 points: (1.99959082 2.00000000)  
Savane [Yellow] 3357 points: (1.75423655 1.99777741)  
Eau [Cyan] 40 points: (1.99999936 2.00000000)

Culture/Jachere [Green] 667 points:  
Foret/ripisilve [Red] 17522 points: (1.98321586 1.99999793)  
Sol urbain/sol nu/inselberg [Blue] 385 points: (1.99983273 2.00000000)  
Savane [Yellow] 3357 points: (1.91006337 1.99314166)  
Eau [Cyan] 40 points: (1.99999987 2.00000000)

Sol urbain/sol nu/inselberg [Blue] 385 points:  
Foret/ripisilve [Red] 17522 points: (1.99959082 2.00000000)  
Culture/Jachere [Green] 667 points: (1.99983273 2.00000000)  
Savane [Yellow] 3357 points: (1.97042649 1.99999990)  
Eau [Cyan] 40 points: (1.99994124 2.00000000)

Savane [Yellow] 3357 points:  
Foret/ripisilve [Red] 17522 points: (1.75423655 1.99777741)  
Culture/Jachere [Green] 667 points: (1.91006337 1.99314166)  
Sol urbain/sol nu/inselberg [Blue] 385 points: (1.97042649 1.99999990)  
Eau [Cyan] 40 points: (1.99998794 2.00000000)

Eau [Cyan] 40 points:  
Foret/ripisilve [Red] 17522 points: (1.99999936 2.00000000)  
Culture/Jachere [Green] 667 points: (1.99999987 2.00000000)  
Sol urbain/sol nu/inselberg [Blue] 385 points: (1.99994124 2.00000000)  
Savane [Yellow] 3357 points: (1.99998794 2.00000000)

- 1986 – Commune de Djougou

Foret/Ripisilve [Red] 6835 points:  
Eau [Red] 37 points: (2.00000000 2.00000000)  
Sol nu/sol urbain/Inselbergs [Green] 479 points: (1.96912275 1.99998534)  
Culture/Jachere [Cyan] 1882 points: (1.99903242 2.00000000)  
Savane [Blue] 7015 points: (1.90567439 1.99999993)

Eau [Red] 37 points:  
Foret/Ripisilve [Red] 6835 points: (2.00000000 2.00000000)  
Sol nu/sol urbain/Inselbergs [Green] 479 points: (2.00000000 2.00000000)  
Culture/Jachere [Cyan] 1882 points: (2.00000000 2.00000000)  
Savane [Blue] 7015 points: (2.00000000 2.00000000)

Sol nu/sol urbain/Inselbergs [Green] 479 points:  
Foret/Ripisilve [Red] 6835 points: (1.96912275 1.99998534)  
Eau [Red] 37 points: (2.00000000 2.00000000)  
Culture/Jachere [Cyan] 1882 points: (1.92230934 1.99989546)  
Savane [Blue] 7015 points: (1.88349327 1.99973328)

Culture/Jachere [Cyan] 1882 points:  
Foret/Ripisilve [Red] 6835 points: (1.99903242 2.00000000)

Eau [Red] 37 points: (2.00000000 2.00000000)  
Sol nu/sol urbain/Inselbergs [Green] 479 points: (1.92230934 1.99989546)  
Savane [Blue] 7015 points: (1.94557782 1.99999704)

Savane [Blue] 7015 points:

Foret/Ripisilve [Red] 6835 points: (1.90567439 1.99999993)  
Eau [Red] 37 points: (2.00000000 2.00000000)  
Sol nu/sol urbain/Inselbergs [Green] 479 points: (1.88349327 1.99973328)  
Culture/Jachere [Cyan] 1882 points: (1.94557782 1.99999704)

- 2000 – Commune de Djougou

Eau [Red] 27 points:

Sol urbain/sol nu/insleberg [Red] 898 points: (2.00000000 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Green] 4078 points: (2.00000000 2.00000000)  
Culture/Jachere [Blue] 6345 points: (2.00000000 2.00000000)  
Savane [Yellow] 2075 points: (2.00000000 2.00000000)

Sol urbain/sol nu/insleberg [Red] 898 points:

Eau [Red] 27 points: (2.00000000 2.00000000)  
Foret/Ripisilve [Green] 4078 points: (1.87905290 1.99999084)  
Culture/Jachere [Blue] 6345 points: (1.68262222 1.98798117)  
Savane [Yellow] 2075 points: (1.73223104 1.99933825)

Foret/Ripisilve [Green] 4078 points:

Eau [Red] 27 points: (2.00000000 2.00000000)  
Sol urbain/sol nu/insleberg [Red] 898 points: (1.87905290 1.99999084)  
Culture/Jachere [Blue] 6345 points: (1.88745747 1.99885161)  
Savane [Yellow] 2075 points: (1.55089638 1.92202071)

Culture/Jachere [Blue] 6345 points:

Eau [Red] 27 points: (2.00000000 2.00000000)  
Sol urbain/sol nu/insleberg [Red] 898 points: (1.68262222 1.98798117)  
Foret/Ripisilve [Green] 4078 points: (1.88745747 1.99885161)  
Savane [Yellow] 2075 points: (1.51205146 1.88227078)

Savane [Yellow] 2075 points:

Eau [Red] 27 points: (2.00000000 2.00000000)  
Sol urbain/sol nu/insleberg [Red] 898 points: (1.73223104 1.99933825)  
Foret/Ripisilve [Green] 4078 points: (1.55089638 1.92202071)  
Culture/Jachere [Blue] 6345 points: (1.51205146 1.88227078)

- 1973 – Bassin de l’Ouémé supérieur

Foret/ripisylve [Red] 15422 points:

Savane [Green] 6536 points: (1.52481236 1.87507041)  
Culture/jachere [Blue] 2643 points: (1.95353729 1.98756141)  
Sol nu/sol urbain/inselberg [Yellow] 123 points: (1.99981055 2.00000000)

Savane [Green] 6536 points:

Foret/ripisylve [Red] 15422 points: (1.52481236 1.87507041)  
Culture/jachere [Blue] 2643 points: (1.80066132 1.99038333)  
Sol nu/sol urbain/inselberg [Yellow] 123 points: (2.00000000 2.00000000)

Culture/jachere [Blue] 2643 points:

Foret/ripisylve [Red] 15422 points: (1.95353729 1.98756141)  
Savane [Green] 6536 points: (1.80066132 1.99038333)  
Sol nu/sol urbain/inselberg [Yellow] 123 points: (1.99999999 2.00000000)

Sol nu/sol urbain/inselberg [Yellow] 123 points:

Foret/ripisylve [Red] 15422 points: (1.99981055 2.00000000)  
Savane [Green] 6536 points: (2.00000000 2.00000000)  
Culture/jachere [Blue] 2643 points: (1.99999999 2.00000000)

- 1986 – Bassin de l’Ouémé supérieur

Foret/ripisylve [Red] 5633 points:

Savane [Green] 1098 points: (1.76689653 2.00000000)  
Sol nu/sol urbain/inselberg [Blue] 182 points: (1.96277487 2.00000000)

Culture/jachere [Yellow] 1972 points: (1.98772276 1.99999999)

Savane [Green] 1098 points:

Foret/ripisylve [Red] 5633 points: (1.76689653 2.00000000)

Sol nu/sol urbain/inselberg [Blue] 182 points: (1.99972973 2.00000000)

Culture/jachere [Yellow] 1972 points: (1.99589095 2.00000000)

Sol nu/sol urbain/inselberg [Blue] 182 points:

Foret/ripisylve [Red] 5633 points: (1.96277487 2.00000000)

Savane [Green] 1098 points: (1.99972973 2.00000000)

Culture/jachere [Yellow] 1972 points: (1.98130134 1.99999999)

Culture/jachere [Yellow] 1972 points:

Foret/ripisylve [Red] 5633 points: (1.98772276 1.99999999)

Savane [Green] 1098 points: (1.99589095 2.00000000)

Sol nu/sol urbain/inselberg [Blue] 182 points: (1.98130134 1.99999999)

- 2000 – Bassin de l’Ouémé supérieur

foret/ripisylve [Red] 7064 points:

cultures/jacheres [Green] 4466 points: (1.94269220 1.99996344)

sol nus/sol nurbain/inselberg [Blue] 175 points: (1.95594045 2.00000000)

savane [Yellow] 4439 points: (1.59110991 1.99993492)

cultures/jacheres [Green] 4466 points:

foret/ripisylve [Red] 7064 points: (1.94269220 1.99996344)

sol nus/sol nurbain/inselberg [Blue] 175 points: (1.95927454 2.00000000)

savane [Yellow] 4439 points: (1.89902645 1.99999970)

sol nus/sol nurbain/inselberg [Blue] 175 points:

foret/ripisylve [Red] 7064 points: (1.95594045 2.00000000)

cultures/jacheres [Green] 4466 points: (1.95927454 2.00000000)

savane [Yellow] 4439 points: (1.98540755 1.99988243)

savane [Yellow] 4439 points:

foret/ripisylve [Red] 7064 points: (1.59110991 1.99993492)

cultures/jacheres [Green] 4466 points: (1.89902645 1.99999970)

sol nus/sol nurbain/inselberg [Blue] 175 points: (1.98540755 1.99988243)

## Annexe II

### Matrice de confusion pour la validation des classifications

- 2010 – Bétérou

Ground Truth (Percent)

Class	Eau_verif	Bas fond/mare	Sol nu/Sol ur	Cultures/Jach	Foret/Ripisil
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Eau [Red] 125	93.75	0.00	0.00	0.00	0.00
arecage [Gree	0.00	96.71	8.58	0.00	0.00
Sol nu/Sol ur	0.00	3.29	89.18	1.19	0.00
Cultures/Jach	0.00	0.00	1.49	97.92	0.00
Foret/Ripisil	3.13	0.00	0.00	0.00	100.00
Savane [Sea G	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00
Cultures arbo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ombres [Maroo	3.13	0.00	0.75	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)

Class	Savane_verif	Cultures arbo	Ombres_verif	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00
Eau [Red] 125	0.00	0.00	0.85	3.08
arecage [Gree	0.00	0.00	0.00	11.58
Sol nu/Sol ur	0.00	0.00	0.00	12.64
Cultures/Jach	0.00	0.00	0.00	16.84
Foret/Ripisil	12.91	10.96	0.00	21.08
Savane [Sea G	80.45	0.00	0.00	23.46
Cultures arbo	6.63	89.04	0.00	5.21
Ombres [Maroo	0.00	0.00	99.15	6.12
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

- 1973 – Commune de Djougou

Ground Truth (Percent)

Class	Unclassified	Masked Pixels	Foret/Ripisil	Culture/Jache	Sol nu/sol ur
Unclassified	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Masked Pixels	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
Foret/ripisil	0.00	0.00	86.60	13.40	1.19
Culture/Jache	0.00	0.00	0.13	80.32	12.43
Sol urbain/so	0.00	0.00	0.00	0.00	47.76
Savane [Yello	0.00	0.00	13.27	6.28	38.63
Eau [Cyan] 40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)

Class	Savane_verif	Eau_verif [Aq	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.25
Masked Pixels	0.00	0.00	40.07
Foret/ripisil	15.75	0.00	35.77
Culture/Jache	5.04	0.00	3.04
Sol urbain/so	0.17	8.14	0.17
Savane [Yello	79.03	3.62	20.70
Eau [Cyan] 40	0.02	88.24	0.01
Total	100.00	100.00	100.00

- 1986 – Commune de Djougou

Ground Truth (Percent)

Class	Unclassified	Masked Pixels	Eau_verif [Ye	Sol nu/sol ur	Foret/ripisil
Unclassified	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Masked Pixels	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
Eau [Red] 37	0.00	0.00	65.55	0.00	0.00
Sol nu/sol ur	0.00	0.00	1.68	76.51	1.45
Foret/Ripisil	0.00	0.00	26.05	0.00	89.73
Savane [Blue]	0.00	0.00	6.72	16.58	8.65
Culture/Jache	0.00	0.00	0.00	6.91	0.18
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)

Class	Savane_verif	Culture/jache	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.12
Masked Pixels	0.00	0.00	81.66
Eau [Red] 37	0.00	0.00	0.00
Sol nu/sol ur	11.85	10.32	0.99
Foret/Ripisil	9.02	0.39	10.60
Savane [Blue]	75.94	19.30	4.64
Culture/Jache	3.19	70.00	2.00
Total	100.00	100.00	100.00

- 2000 – Commune de Djougou

Ground Truth (Percent)

Class	Unclassified	Masked Pixels	Foret/Ripisil	Eau_verif [ReSol urbain/so
Unclassified	100.00	0.00	0.00	0.00
Masked Pixels	0.00	100.00	0.00	0.00
Foret/Ripisil	0.00	0.00	77.75	0.00
Eau [Red] 27	0.00	0.00	0.00	88.61
Sol urbain/so	0.00	0.00	1.34	0.00
Culture/Jache	0.00	0.00	0.25	0.00
Savane [Yello	0.00	0.00	20.66	11.39
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Percent)

Class	Culture/Jache	Savane_verif	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.07
Masked Pixels	0.00	0.00	81.67
Foret/Ripisil	1.05	4.76	6.58
Eau [Red] 27	0.00	0.00	0.00
Sol urbain/so	9.40	6.47	0.95
Culture/Jache	84.42	19.05	3.30
Savane [Yello	5.13	69.72	7.44
Total	100.00	100.00	100.00

- 1973 – Bassin supérieur de l’Ouémé

Ground Truth (Percent)

Class	Foret/ripisyl	Savane_verif	Sol nu/sol ur	Culture/jache	Total
Unclassified	0.00	19.34	0.00	0.00	3.67
Foret/ripisyl	96.73	1.54	0.00	25.04	64.52
Savane [Green	3.27	78.84	0.00	0.00	16.98
Sol nu/sol ur	0.00	0.00	100.00	0.00	0.54
Culture/jache	0.00	0.28	0.00	74.96	14.29
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

- 1986 – Bassin supérieur de l’Ouémé

Ground Truth (Percent)

Class	Savane_verif	Sol nu/sol ur	Culture/jache	Foret/ripisylv	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Savane [Green	99.24	0.00	0.88	0.09	20.04
Sol nu/sol ur	0.00	85.21	0.00	0.00	2.01
Culture/jache	0.00	7.75	99.12	0.00	39.40
Foret/ripisylv	0.76	7.04	0.00	99.91	38.55
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

- 2000 – Bassin supérieur de l’Ouémé

Ground Truth (Percent)

Class	foret/ripisyl	cultures/jach	sol nus/sol n	savane_verif	Total
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
foret/ripisyl	88.84	0.00	0.50	0.40	32.43
cultures/jach	0.49	99.97	0.00	0.00	48.23
sol nus/sol n	0.00	0.03	99.50	0.00	3.28
savane [Yello	10.66	0.00	0.00	99.60	16.06
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

## Annexe III

### Cartographie des transitions incohérentes et estimation des erreurs de classification

- Règles de décision pour l'estimation des incertitudes de classification pour la cartographie des dynamiques d'occupation du sol

#### 1. Dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2000 sur la commune de Djougou

Codage des classes :

1986	2000
0 → masque	0 → masque
10 → forêt	1 → eau
20 → eau	2 → sol nu ou sol urbain
30 → sol nu ou sol urbain	3 → forêt
40 → culture ou jachère	4 → culture ou jachère
50 → savane	5 → savane

Classe	Règle de décision	Exemple et classification	
<b>Masque</b>	Toutes les combinaisons avec un 0	0, 01, 02... 10, 20, 30....	
<b>Pas de changement</b>	Classes pour lesquelles la classe pour la première année correspond à celle de la seconde	13 : forêt 44 : culture 55 : savane 32 : sol nu	
<b>Changements logiques</b>	Classes pour lesquelles les transitions correspondent à des dynamiques logiques d'évolution	12 : Extension des espaces urbains 14 ou 54 : mise en culture	
<b>Changements considérés comme logiques</b>	*Toutes les combinaisons avec la classe eau ont été classées en eau (cf. que quelques pixels de concernés) * Transitions forêt /Savane ou Savane/Forêt sont considérées comme logiques en raison de la confusion possible	*11 : 1 pixels, classés en eau  *15 et 53	Cohérent
<b>Dynamiques non logiques</b>	*Passage Sol nu/Foret ou savane *Confusion sol	*33 et 35 (classés en forêt ou savane) *34 et 42 (classés	Incertitudes de classification

nu/culture	en culture)
*Passage Culture/forêt	*43 et 45 (classés
ou savane	en forêt ou savane)

## 2. Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2000 sur le bassin supérieur de l'Ouémé

Codage des classes :

1973	1986	2000
0 → masque	0 → masque	0 → masque
100 → forêt	10 → forêt	1 → forêt
200 → savane	20 → savane	2 → culture ou jachère
300 → culture ou jachère	30 → sol nu ou urbain	3 → sol nu ou urbain
400 → sol nu ou urbain	40 → culture ou jachère	4 → savane

Classe	Règle de décision	Exemple et classification	
<b>Masque</b>	Toutes les combinaisons avec un 0	0,01... 110, 120... 200, 300, 400...	
<b>Pas de changement</b>	Classes pour lesquelles la classe ne change pas pour les trois dates	111 : forêt 224 : savane 342 : culture 433 : sol nu	
<b>Changements logiques</b>	Classes pour lesquelles les transitions correspondent à des dynamiques logiques d'évolution	142 : mise en culture entre 1973 et 1986 133 : extension des surfaces urbaines entre 1973 et 1986 222 : mise en culture entre 1986 et 1973...	Cohérent
<b>Changements considérés comme logiques</b>	Transitions forêt/savane>savane/forêt>culture ou sol nu sont considérées comme logiques en raison de la confusion possible	212 : mise en culture entre 1986 et 2000 123 : extension des surfaces urbaines entre 1986 et 200	
<b>Dynamique non logiques</b>	*passage sol nu/culture puis savane ou forêt * Alternance sol nu/culture (1973) > forêt/savane (1986) > sol nu/culture (2000) *Alternance forêt/savane (1973)> culture/sol nu (1986) >	* 341 : culture (confusion forêt et jachère ancienne en 2000) 444 : culture (confusion sol nu	Incertitudes de classification

forêt/savane (2000) * Confusion sol nu ou urbain et culture	et culture en 1973 et savane et jachère ancienne en 2000) *322 : culture 323 : culture (confusion sol nu et culture en 2000) 413 : sol nu *131 : forêt 244 : Savane *433 : sol nu 443 : sol nu 442 : culture
--	--

### 3. Dynamique de l'occupation du sol entre 1973 et 2012 sur le bassin supérieur de l'Ouémé

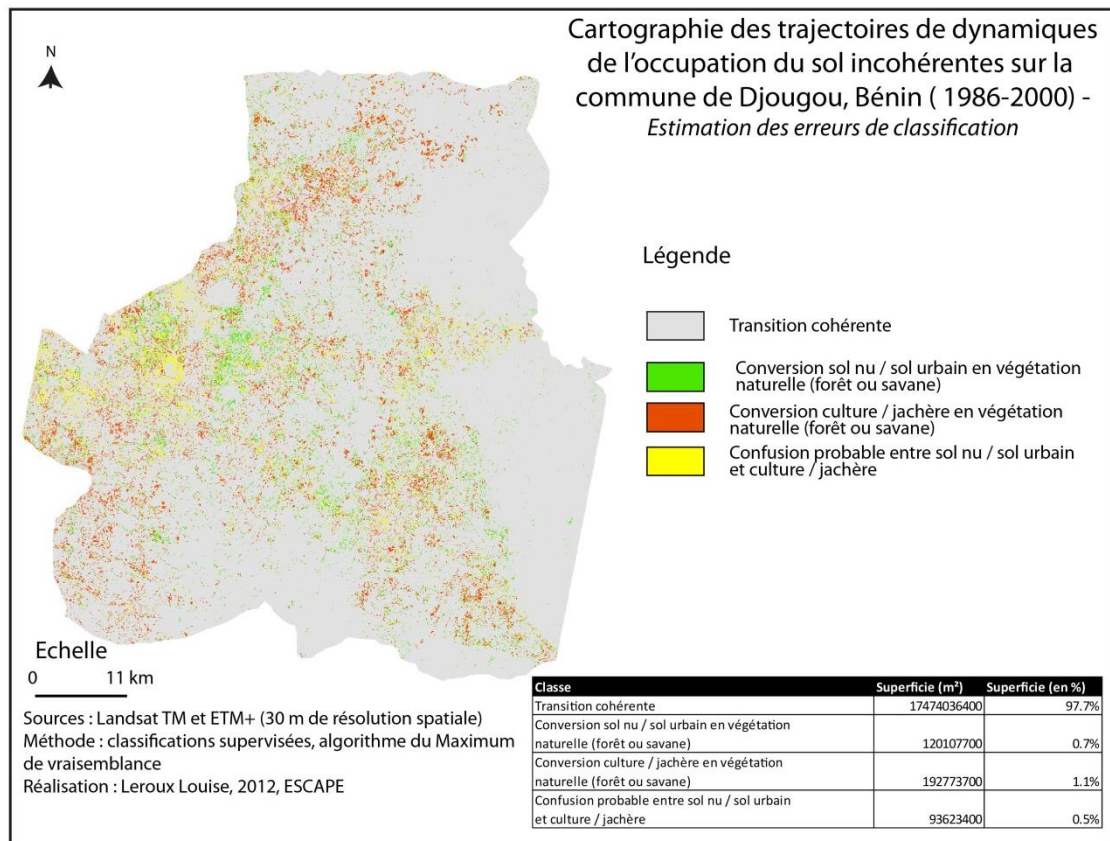
Codage des classes

1973	1986	2000	2012
0 → masque	0 → masque	0 → masque	0 → masque
1000 → culture/sol nu	100 → culture/sol nu	10 → culture/sol nu	1 → culture/sol nu
2000 → forêt	200 → forêt	20 → forêt	2 → forêt
3000 → savane	300 → savane	30 → savane	3 → savane

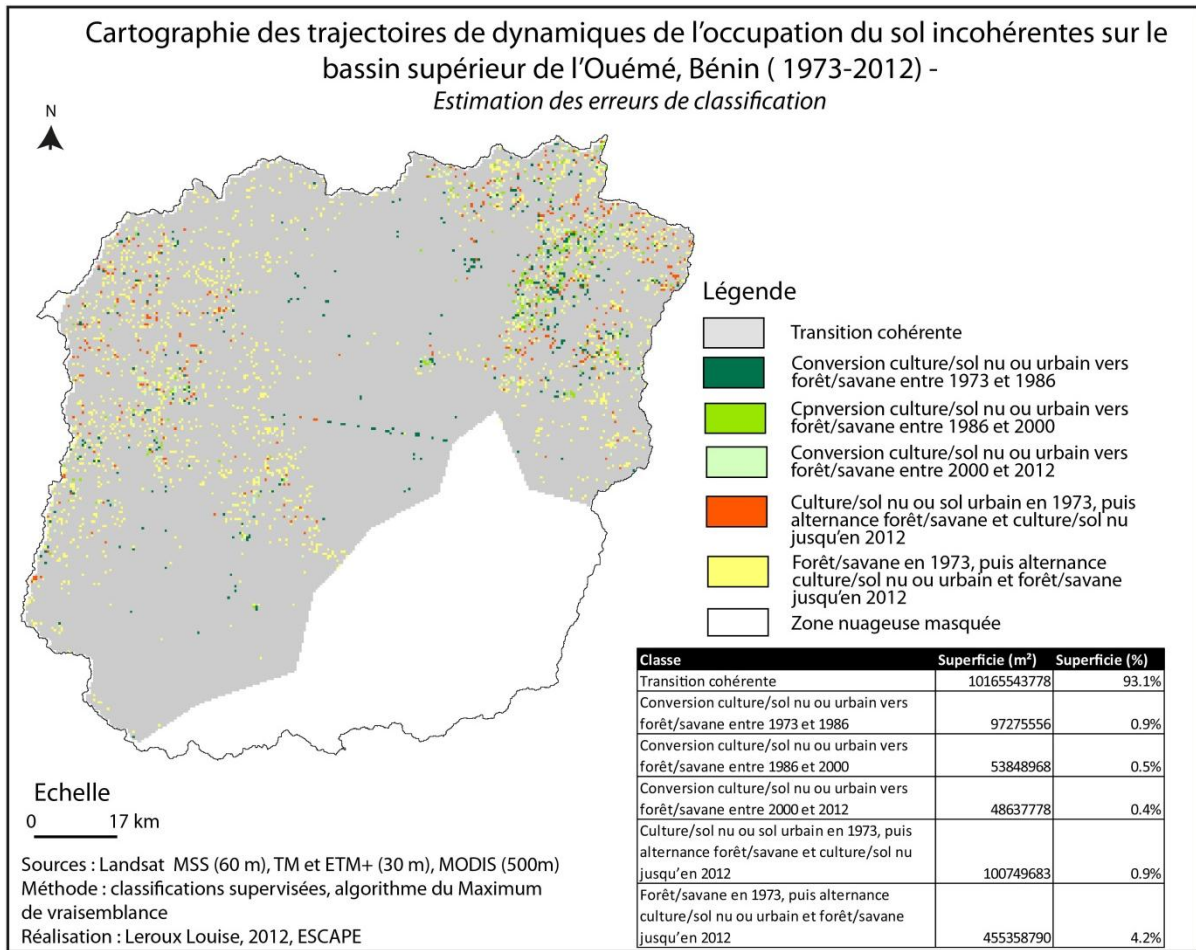
Classe	Règle de décision	Exemple et classification	
<b>Masque</b>	Toutes les combinaisons avec un 0	0,0001,0002...,1000,1001,... 2021,3310...	
<b>Pas de changement</b>	Classes pour lesquelles la classe ne change pas pour les quatre dates	1111 : culture / sol nu 2222 : forêt 3333 : savane	
<b>Changements logiques</b>	Classes pour lesquelles les transitions correspondent à des dynamiques logiques d'évolution	2221 : mise en culture entre 2000 et 2012 3311 : mise en culture entre 1986 et 2000	Cohérent
<b>Changements considérés comme logiques</b>	*Transition avec alternance forêt/savane vers culture sont considérées comme logique en raison de la confusion *Alternance forêt/savane sur les 4 ans	*2321 : mise en culture entre 2000 et 2012 2311 : mise en culture entre 1986 et 2000  *3222 : forêt 3232 : savane 3233 : savane 3322 : forêt	

<b>Dynamique non logiques</b>	*transition culture>foret ou savane	*1112 et 1113 : culture (confusion avec jachère ancienne en 2012) 1132 et 1133 : culture (confusion avec jachère ancienne à partir de 2000) 1222 : forêt 1232 : forêt 1323 : savane	Incertitudes de classification
	*Culture en 1973 et alternance culture/foret/savane	*1221 : culture 1212 : culture 1231 : culture 1331 : Culture	
	*Savane ou foret en 1973 et alternance culture/foret/savane	*2121 : forêt 3313 : savane 2122 : forêt 3131 : savane 3123 : savane	

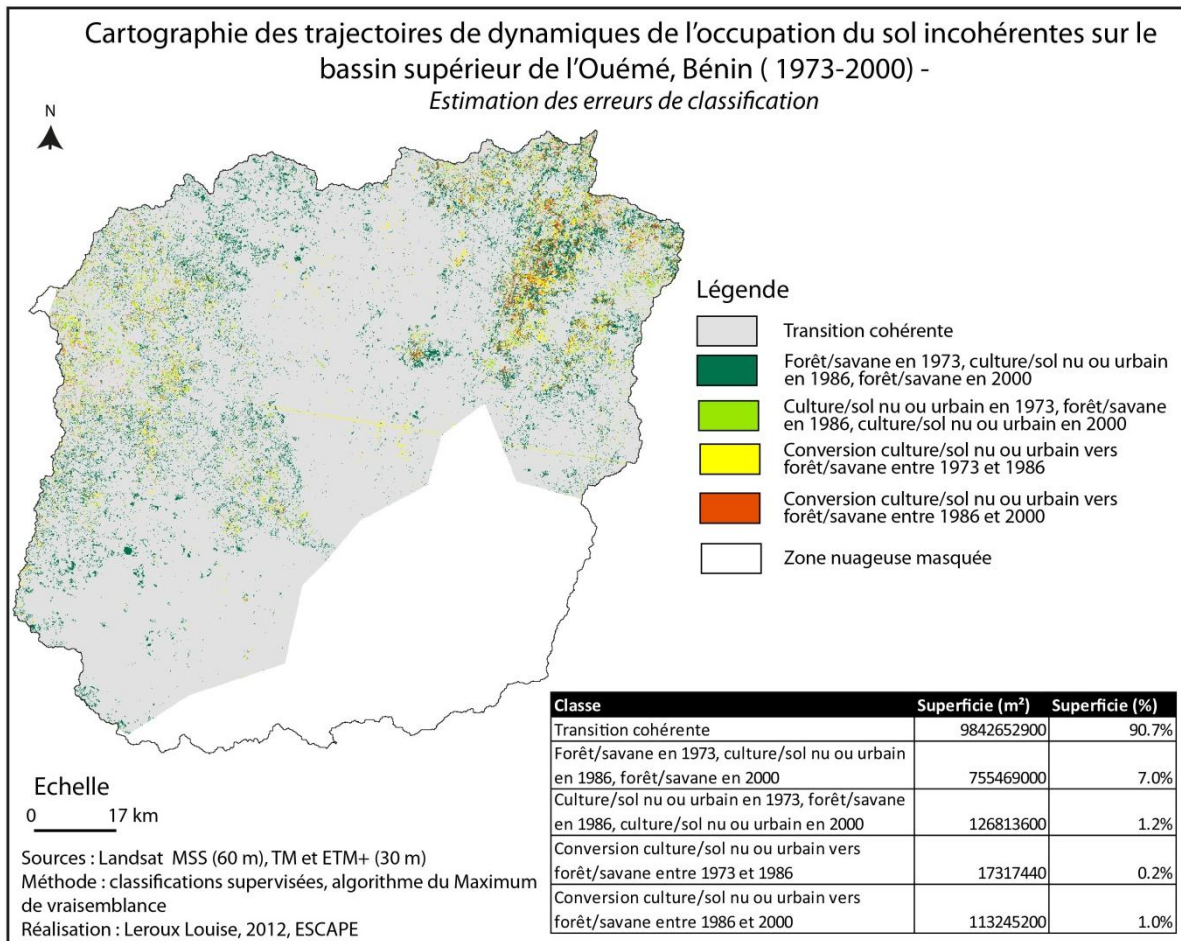
- Communal de Djougou – 1986 – 2000



- Bassin supérieur de l’Ouémé – 1973 – 2012



- Bassin supérieur de l’Ouémé – 1973 – 2000



## Annexe IV

### Cartographie dynamique de l'occupation du sol sur le bassin supérieur de l'Ouémé, entre 1973 et 2000 (Bénin)

