



CARTOGRAPHIE ET ANALYSE DIACHRONIQUE DES ETATS DE SURFACE PAR LA TELEDETECTION SUR UN BASSIN SAHELIEU : CAS DE TOUGOU (NORD DU BURKINA FASO)

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER 2

FILIERE/OPTION : Infrastructures et Réseaux Hydrauliques /Eau Souterraine

Présenté et soutenu publiquement le 20 Juin 2018 par

Arzouma Rodrigue MOUMOUA

Travaux dirigés par :

M. Roland YONABA

Doctorant, Laboratoire Eau, HydroSystèmes et Agriculture (LEHSA), 2iE

M. Cheick Omar ZOURE

Doctorant, Laboratoire Eau, HydroSystèmes et Agriculture (LEHSA), 2iE

Dr. Dial NIANG

Enseignant-chercheur, Laboratoire Eau, HydroSystèmes et Agriculture (LEHSA), 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Mahamadou KOÏTA

Membres et correcteurs : M. Richard SANOU
M. Thiam SINA
M. Bouraima KOUANDA

Promotion [2016/2017]

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents, Arsène Kayaba MOUMOUULA et Bernadette MOUMOUULA, eux qui, depuis les premiers instants de mon existence se sont attelés à mon éducation au prix de nombreux sacrifices ; merci de m'avoir inculqué le sens de la responsabilité et la culture du travail, je vous dois ce que je suis aujourd'hui, soyez bénis.

À mes frères et sœurs pour les encourager à toujours persévérer dans leurs études.

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de ce travail est le fruit de plusieurs contributions d'horizons divers. Je voudrais ainsi exprimer ma reconnaissance :

- Au membres du jury, Dr. Mahamadou KOÏTA, M. Thiam SINA, M. Richard SANOU, M. Bouraima KOUANDA pour leurs contributions dans l'amélioration du document ;
- Au Dr. Dial NIANG, qui a accepté la responsabilité de ce mémoire et qui m'a prodigué de précieux conseils tout au long de mon stage. Qu'il soit assuré de mon profond respect ;
- À M. YONABA Roland, pour l'expérience très enrichissante tant scientifique qu'humaine qu'il m'a permis de vivre et surtout pour les efforts qu'il n'a eu de cesse de déployer pour la réalisation de ce travail. J'aimerais ainsi qu'en ces mots il y trouve l'expression de ma profonde gratitude ;
- À M. Cheick Omar ZOURE, M^{lle} Radegonde RUSAGARA, M. Mathieu KABORE dont les sacrifices et les efforts m'ont permis de produire ce travail ;
- À tous les stagiaires Tougou 2017 pour les efforts consentis durant la collecte des données.

Il me plait particulièrement d'adresser mes sincères remerciements au Dr. Mahamadou KOITA et à l'ensemble du corps enseignant de 2iE pour toutes les connaissances scientifiques que j'ai pu recevoir durant ma formation.

À tous mes amis, complices j'exprime ma profonde reconnaissance pour le temps précieux que vous m'avez adressé.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

RESUME

La hausse des écoulements dans le milieu sahélien est reliée à la modification des états de surface qui connaissent une dynamique spatio-temporelle accentuée par la péjoration climatique et par la pression anthropique que subissent les sols du contexte sahélien. Pour que cette dynamique soit prise en compte dans la compréhension des processus hydrologiques, la cartographie des états de surface s'avérait nécessaire. La présente étude, conduite sur le bassin de Tougou (au Nord du Burkina Faso), de type sahélien vise à cartographier l'évolution des états de surface par la télédétection et à faire l'analyse diachronique du milieu sur la période de 1986 à 2017. La démarche méthodologique adoptée a consisté à analyser la dynamique intra saisonnière du milieu à l'aide d'indices radiométriques (*NDVI*, *NDI5*, *BI*) pour déterminer la période optimale de cartographie. Des zones d'entraînement ont été échantillonnées et ont permis de comparer les performances relatives d'algorithmes de classification supervisée (*Maximum de vraisemblance* ; *Distance de Mahalanobis* ; *Support Vector Machine*). Des critères de performance (Score Kappa, Précision globale, F1-Score) ont permis d'identifier la Distance de Mahalanobis comme étant l'algorithme optimal. Les cartes d'états de surface ont été produites aux dates 1986, 1999, 2009 et 2017. L'analyse diachronique a révélé une diminution de la végétation naturelle (de 10% à 3% ; -0,22%/an), mais une hausse des sols cultivés (46% à 65% ; +0,61%/an) et dégradés (47% à 33% ; +0,45%/an) sur la période 1986 à 2017. Les changements nets, gains et pertes relatives dans l'espace et contributions ont pu être mis en relation avec l'évolution démographique du milieu.

Mots clés : Analyse diachronique, Cartographie, Etats de surface, Télédétection, Tougou,

ABSTRACT

The runoff increase of flows in the Sahelian environment, namely the sahelian paradox has been related to the modification of the soil surface conditions. Soils in this context experienced different spatio-temporal trends and dynamics after 1970, under the influence of climatic deterioration and anthropic pressure. As such, to account for new runoff generation processes in the understanding of hydrological processes, the mapping of the soil surface state is mandatory. This study, conducted in the Tougou sahelian watershed (north of Burkina Faso), aims to map the evolution of surface state through remote sensing from 1986 to 2017. The methodological approach adopted was to analyze intra-seasonal dynamics of the environment using radiometric indices (NDVI, NDI5, BI) to determine the optimal mapping period. Training areas were sampled and used to compare the relative performance of three supervised classification algorithms (*Maximum likelihood*, *Mahalanobis distance*, *Support Vector Machine*). Analysis of performance indicators (Kappa Score, Overall Accuracy, F1-Score) identified *Mahalanobis Distance* as the optimal algorithm. Maps were produced at the dates 1986, 1999, 2009 and 2017. A diachronic analysis shows a decrease in natural vegetation (from 10% to 3%, -0.22% / year), but an increase in cultivated soils (46% to 65%, + 0.61% / year) and degraded soils (47% to 33%, + 0.45% / year) over the period 1986 to 2017. Net changes, gains and losses in space and relative contributions were related to demographic evolution of the environment.

Key words: Diachronic analysis, Mapping, Remote sensing, Soil surface states, Tougou

LISTES DES SIGLES ET ABBREVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement
6S	: Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
IWACO	: Bureau d'études en Eau et Environnement
ZC	: Zones Cultivées
ZD	: Zones Dégradées
ZVN	: Zones à Végétation Naturelle
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
IB	: Indice de brillance
NDI5	: Normalized Difference Index 5
BNDT	: Base Nationale de Données Topographiques
BDOT	: Base de Données d'Occupation des Terres
EDS	: Etats de surface
FIT	: Front Inter Tropical
INSD	: Institut National de la Statistique et de la Démographie
USGS	: United States Geological Survey

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Taux d'occupations de sols dans la zones du nord.....	5
Tableau 2 : Exemple cartographies des états de surface	8
Tableau 3 : Quelques capteurs en télédétection	11
Tableau 4 : Les générations de capteurs LANDSAT depuis 1972.....	12
Tableau 5 : Evolution de la population à Tougou de 1952 à 2004.....	17
Tableau 6 : Chronogramme d'activités	22
Tableau 7 : Indices radiométriques utilisés pour la dynamique saisonnière	25
Tableau 8 : Matrice de confusion.....	26
Tableau 9 : Résultats des tests de séparabilités	28
Tableau 10 : Score de performance des différents algorithmes	29
Tableau 11 : Taux d'évolution des états de surface de 1986 à 2017.....	31
Tableau 12 : Pourcentage de gains et de pertes entre 1986 et 2017	31

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Evolution de la population du au Yatenga et Tougou(Marchal, 1983; Sawadogo et al., 2008).....	5
Figure 2 : Illustration des modes de transformation du milieu (Diello, 2007).....	7
Figure 3 : Signatures spectrales de l'eau, le sol et la végétation	9
Figure 4 : Principe de fonctionnement de la télédétection	10
Figure 5 : Localisation du bassin versant de Tougou.....	13
Figure 6 : Evolution de l'IPS à la station de Ouahigouya (1961-2015).....	14
Figure 7 : Réseau hydrographique du bassin versant de Tougou.....	15
Figure 8 : Le relief du bassin versant de Tougou	16
Figure 9 : Les sols de Tougou	17
Figure 10 : Occupation des sols de Tougou (BDOT,1992-2002)	19
Figure 11 : Diagramme méthodologique de la cartographie des états de surface.....	21
Figure 12 : Illustration des images radiométriques à différentes dates	24
Figure 13 : Illustration de la dynamique saisonnière de l'indice de brillance.....	27
Figure 14 : Illustration de la dynamique saisonnière NDI5	28
Figure 15 : Illustration de la dynamique saisonnière du NDVI	28
Figure 16 : Carte des états de surface à Tougou en 2017.....	30
Figure 17 : Cartographie des états de surface	31
Figure 18 : Changement net des états de surface	32
Figure 19 : Gains et pertes des états de surface entre 1986 et 1999.....	32
Figure 20 : Gains et pertes des états de surface entre 1999 et 2009.....	33
Figure 21 : Gains et pertes des états de surface entre 2009 et 2017.....	33
Figure 22 : Contribution de ZD et ZC à la dynamique de ZVN	34
Figure 23 : Contribution de ZC et ZVN à la dynamique de ZD	34
Figure 24 : Contribution de ZVN et de ZD à la dynamique de ZC.....	35

SOMMAIRE

Introduction	1
I. REVUE DE LA LITTERATURE	4
I.1. La dynamique du milieu Sahélien.....	4
I.2. Notion d'état de surface	6
I.3. Télédétection.....	9
I.3.1. Définition et principes de télédétection	9
I.3.2. Quelques types de capteurs en télédétection.....	10
I.3.3. Avantages et limites de la télédétection.....	11
I.3.4. Le capteur Landsat	12
II. MATERIEL ET METHODES	13
II.1. Présentation du cadre de l'étude	13
II.1.1. Le cadre physique :.....	13
II.1.2. Le cadre humain	17
II.1.3. Les travaux antérieurs.....	20
II.2. Méthodologie pour la cartographie des états de surface.....	20
II.2.1. La notion d'état de surface	20
II.2.2. Diagramme méthodologique de cartographie d'états de surface.....	21
II.2.3. Chronogramme d'activités	22
II.3. Méthodes d'analyse diachronique	26
III. RESULTATS.....	27
III.1. L'analyse de la dynamique saisonnière.....	27
III.2. L'analyse diachronique	31
IV. DISCUSSION ET ANALYSES.....	36
CONCLUSION	38
V. LIMITES, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	39
Bibliographie	40
ANNEXES.....	44

Introduction

Depuis les années 1970 les fluctuations climatiques préoccupent les communautés de chercheurs, créant ainsi un enjeu tant scientifique que géopolitique (Dalmedico, Guillemot, 2006). Plusieurs voix s'accordent à dire que le continent africain est le plus touché par les effets de la variabilité climatique (Mahé, 1993). Entre autres, la zone du SAHEL a connu des périodes de sécheresse sur les trois dernières décennies qui se sont caractérisées par leur intensité, leur durée et leur extension spatiale (Paturel et al., 1998; Ouédraogo et al., 2001). En effet l'analyse de la pluviométrie à différentes échelles temporelles et au cadre régional montre un consensus sur la non stationnarité des hauteurs pluviométriques et même une discordance des séries pluviométriques à partir des années 1970 (Albergel, 1986; Mahé et al., 2005; Mara, 2010). Beaucoup d'auteurs interprètent cela comme une rupture tandis que d'autres se réservent ou voient cette situation comme une persistance exceptionnelle mais probabiliste d'années déficitaires (Pouyaud, 1987). Le déficit pluviométrique alors observé est de l'ordre de -20 à -40% (Le Barbé et al., 2002; Mara, 2010).

Les sécheresses ayant frappé le sahel (1972-1973 ;1983-1985), ont été à l'origine de la réduction de la biomasse des plantes herbacées et graminées et la disparition de plusieurs ligneux occasionnant ainsi directement la dégradation de l'environnement (Hulme et al., 2001; Descroix, Diedhiou, 2012a). En plus, l'explosion démographique après les années 1960 (taux d'accroissement d'environ 3% par an) dans la plupart des pays sahéliens a accentué la pression anthropique sur les ressources naturelles (Hulme et al., 2001; Botoni, Reij, 2009). Dans les régions sahéliennes, la durée de la jachère, système traditionnel de restauration de la fertilité des sols, a été raccourci et a même disparu (Marchal, 1983; Botoni, Reij, 2009; Descroix, Diedhiou, 2012a). Les agriculteurs ont dû étendre les surfaces cultivées pour combler la baisse des rendements et surtout pour faire face à des besoins plus importants (Marchal, 1983; Botoni, Reij, 2009). Les conséquences ont donc été la disparition progressive de la végétation et la dégradation physique, biologique et chimique des sols, qui ont abouti à une apparition et une extension de sols dénudés et recouverts de croûtes d'érosion (Casenave, Valentin, 1989). De l'analyse des auteurs ressort une certaine similarité quant à la chaîne de causalité de la dégradation des sols même si l'absence de données précises ne permet pas de désigner des processus responsables de la dégradation environnementale (Thiombiano, 2000; Niang, 2006).

Plusieurs études ont rapporté une hausse des écoulements aux exutoires des bassins des rivières d'Afrique de l'ouest sahélienne et subdésertique. Ce constat reste paradoxal au vu de la tendance à la baisse des cumuls annuels de pluie dans le même espace depuis la fracture climatique observée en 1970 (Albergel, 1987; Mahé, Paturel, 2009; Panthou et al., 2014; Amogu et al., 2015). Un tel paradoxe pourrait trouver son explication dans l'augmentation des coefficients d'écoulements en zone sahélienne du fait de la modification des caractéristiques de la surface du sol (Pouyaud, 1987; L'hôte et al., 2002; Mahé, Paturel, 2009) mais aussi par une augmentation des pluies extrêmes (Panthou et al., 2014). Dans les zones où la végétation a disparu, il s'est développé à la surface du sol, par effet *splash*, une pellicule indurée et très peu perméable (croûte d'érosion), laquelle constitue un milieu beaucoup plus favorable au ruissellement qu'à l'infiltration (Casenave et Valentin, 1989). Cette modification est donc l'action conjointe des actions naturelles et anthropiques.

Cet état de fait, que l'on peut qualifier de changement des normes et processus hydrologiques (Karambiri et al., 2003), reste l'une des problématiques majeures qui constitue, de ce fait, une épine dans l'étude hydrologique des bassins du contexte sahélien. On se demande alors : quelles considérations faut-il donner aux états de surface ? quelle évolution spatio-temporelle ont-ils connu ? Quelle est leur aptitude au ruissellement ? Comment évolue leur répartition dans le temps et dans l'espace ? Casenave et Valentin (1989) ainsi que Valentin et Bresson (1992) ont proposé des modalités de surfaces élémentaires pour la zone sahélienne, ainsi que leur comportement hydrodynamique, leur schéma d'évolution et de transition. Cette dynamique est dans certains cas lente et prévisible et peut dans d'autres cas être perturbée et accélérée par le fait anthropique et climatique. Qu'elle soit saisonnière ou à long terme, il a été déjà démontré qu'elle a des répercussions sensibles sur les écoulements à l'échelle du bassin versant (Boiffin, Monnier, 1986; Casenave, Valentin, 1989). Il apparaît donc important d'intégrer, en marge ou en amont de l'étude hydrologique, une étude précise de la dynamique du milieu au moyen de la cartographie.

Cependant si la dynamique des états de surfaces est un fait indéniable, elle reste difficile à cerner avec précision au vu des grandes surfaces parfois à couvrir et des résultats souvent contradictoires obtenus sur différentes études avec différents moyens (Ozer, 2004; Sawadogo et al., 2008a). Cette situation souligne à la fois les difficultés d'ordre technique, pratique et économique. La télédétection et l'imagerie satellitaire dont l'application suscite un intérêt croissant dans la communauté scientifique (Diello, 2007; Sawadogo et al., 2008a) est un moyen d'observation continue à différentes échelles de la terre. Les différentes images satellitaires

permettent de faire une étude synchronique ou diachronique. Dans le cas spécifique de cette étude, nous avons retenu cette approche de cartographie à l'échelle d'un bassin versant représentatif du contexte sahélien en termes de climat, de localisation, d'activités agropastorales et d'états de surface du sol. Il s'agit du bassin versant de Tougou, 37 km² (situé dans le Yatenga, région Nord du Burkina Faso). Ce bassin a fait l'objet de plusieurs études, notamment la description de la dynamique du paysage sur la période 1952 à 1973 par Marchal (1983), d'un suivi hydrologique et hydrogéologique dans le cadre du programme Bilan d'Eau (IWACO, 1990, 1993), puis d'une instrumentation et un suivi plus rigoureux depuis 2004 par 2iE. Les données donc à disposition permettent d'avoir un aperçu historique plutôt complet de son évolution sur le plan climatique, environnemental et humain.

L'objectif principal de notre travail est d'établir les grandes tendances de la dynamique spatio-temporelle des états de surface sur le bassin versant de Tougou sur la période 1952-2017. De manière spécifique il s'agira de :

- Proposer une période optimale et algorithme efficace de cartographie
- Analyser la dynamique spatio-temporelle des états de surface sur le bassin versant de Tougou ;

I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.1. La dynamique du milieu Sahélien

Le Sahel aux lendemains des sécheresses des années 1970 et 1980 présentait un visage sombre faisant de lui un milieu fragile (Niang, 2006; Botoni, Reij, 2009). De l'avis des paysans : *«Il n'y a plus de brousse, il n'y a plus de bêtes sauvages, les gens sont devenus nombreux, les pluies ont diminué, la terre est fatiguée»* (Luxereau, Roussel, 1997). Ce constat amer traduit une situation de double rupture : écologique et socio-économique (Botoni, Reij, 2009).

Sur le plan hydro-climatique, les changements suivants ont été observés :

- une descente en latitude des isohyètes qui entraîne une baisse de la pluviométrie annuelle pouvant atteindre 20 à 25% (Albergel, 1987; Le Barbé et al., 2002; Mara, 2010) ;
- une réduction de la pluviométrie journalière supérieure à 40 mm (Albergel, 1987; Mara, 2010) ;
- une diminution du nombre d'événements pluvieux, surtout durant les mois de juillet et août (Carbonnel, Hubert, 1992) ;
- une augmentation des débits aux exutoires (Amogu et al., 2015)

Sur le plan écologique, les changements suivants ont été observés :

- une mortalité sélective des plantes ligneuses dont certaines se sont raréfiées jusqu'à être menacées de disparition complète (Ganaba, 1999; Descroix, Diedhiou, 2012b);
- le développement de croutes qui influencent le ruissellement (Casenave, Valentin, 1989)
- une dégradation des terres avec augmentation des zones dénudées poussant les ligneux à se concentrer dans les axes de drainage qui sont plus humides (Marchal, 1983);
- une réduction de la biodiversité animale et végétale (Ganaba, 1999);

La zone du Nord au Burkina Faso, considérée comme soumise au climat semi-aride de type sahélien, a connu des sécheresses épisodiques. Plusieurs auteurs ont montré à travers leurs études que le YATENGA a connu une nette diminution de la pluviométrie. Nous retiendrons que l'année 1970, prise à titre d'exemple, a bien été inférieure à la moyenne : 472,7 mm pour 720 mm en moyenne (Marchal, 1983). Les données climatiques à la station de Ouahigouya ont permis de tracer la courbe d'évolution de la pluviométrie depuis 1961.

Les périodes de sécheresses (1972-1973 ;1983-1985) ont provoqué une rupture du cycle agricole et une déroute de la vie sédentaire comme celle des pasteurs. Les calamités naturelles peuvent expliquer facilement, dans le court terme, la chute des productions agricoles et les

disettes ou les famines (Marchal, 1983). Cependant il faut noter que les mauvaises pratiques agricoles et la pression démographique ont contribué pour beaucoup à la destruction de l'écosystème. Une étude démographique montre une forte humanisation du milieu malgré le flux migratoire qu'a connu la zone autour des années 1970. La Figure 1 ci-dessous montre l'évolution de la population dans la province du Yatenga.

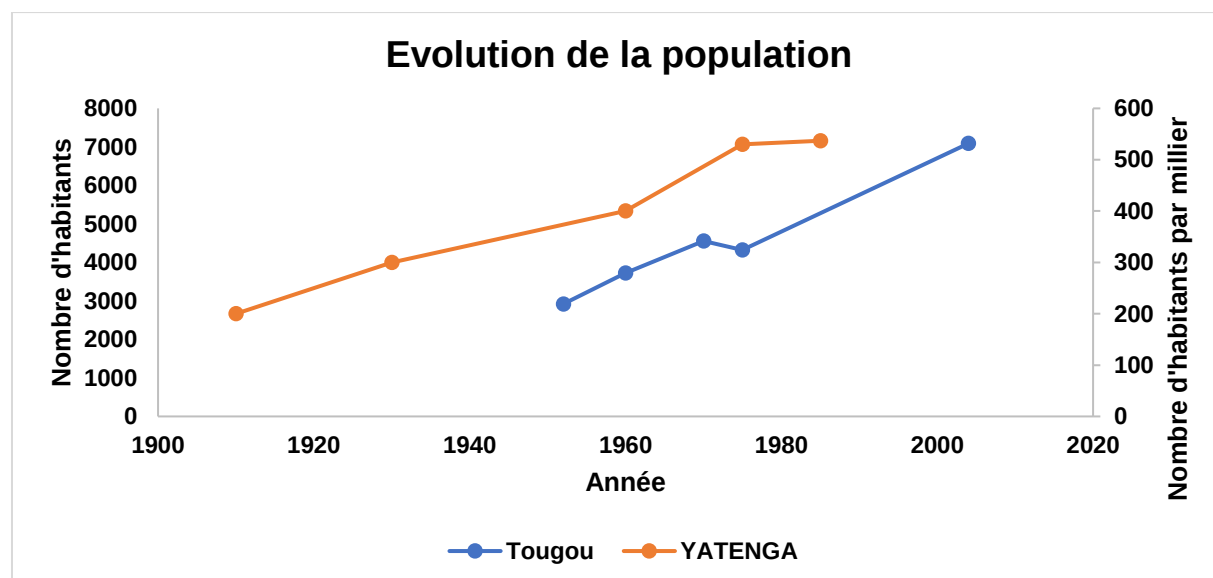


Figure 1: Evolution de la population du au Yatenga et Tougou(Marchal, 1983; Sawadogo et al., 2008)

Le poids de plus en plus lourd des effectifs humains s'est accompagné en moins d'un siècle d'une pénurie de terres cultivables, de la réduction des temps de jachère, de l'apparition des litiges fonciers, de l'épuisement progressif des sols, du développement de l'érosion et, en conséquence de tout cela, d'une chute de la production agricole. Une situation confirmée par les chiffres de différentes études consignés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Taux d'occupations de sols dans la zones du nord

	(Marchal, 1983) (Tougou, Yatenga)			(Sawadogo et al., 2008) (Ziga, Yatenga)			(Diello, 2007) (NAKAMBE)		
	1952	1973	Evolution	1952	1984	Evolution	1972	2002	Evolution
Végétation	35,3%	13,1%	-22,2%	18%	3%	-15%	43%	0%	-43%
Sols dégradé	6,1%	17,4%	11,3%	53%	59%	6%	0%	21%	21%
Sols cultivé	50,25%	59,25%	9%	2%	7%	5%	57%	79%	22%
Jachère	8%	6%	-2%	15%	9%	-6%	-	-	-

La raison de l'augmentation des surfaces cultivées est que les techniques de production semblent avoir régressé et que le système d'exploitation est devenu gros consommateur d'espace (Marchal, 1983; Sawadogo et al., 2008). D'autant plus que l'élevage n'était pas associé à la culture avec l'utilisation de la fumure (Marchal, 1983). La régression de la végétation a privé

les sols d'une couverture protectrice, d'où leur exposition à la formation d'organisations pelliculaires de surface qui influencent l'écoulement. Les sols deviennent squelettiques et cuirassés (Casenave, Valentin, 1989). Par conséquent, l'infiltration de l'eau est faible et l'humidité n'y est pas maintenue, mais le ruissellement est intense (Diello, 2007; Sawadogo et al., 2008). De ce fait la notion d'état de surface est de plus en plus abordée pour caractériser au sens hydrologique le milieu, son évolution et son aptitude au ruissellement.

I.2. Notion d'état de surface

Le concept d'état de surface est une notion qui a été largement abordée par plusieurs auteurs surtout dans le contexte sahélien où il a une influence significative sur le ruissellement. Toute fois sa définition précise reste compliquée surtout qu'elle dépend du type d'étude et de l'échelle d'observation (Casenave, Valentin, 1989; Puech, 1993; Armand, 2009). Ainsi donc on remarque plusieurs apports concernant la définition du concept d'état de surface. Mais nous retiendrons principalement les définitions de Lamachère (1994) et de Casenave et Valentin, (1989). Ces deux grands auteurs ont beaucoup étudié dans le contexte climatique sahélien.

Casenave et Valentin (1989) décrit le terme "*état de surface*" comme une seule surface élémentaire, la juxtaposition de plusieurs, ou un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire un ensemble, au sein duquel jouent des interactions. Le terme "*surface élémentaire*" désigne, à un instant donné, un ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivants : le couvert végétal, la surface du sol, les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations, sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques.

Lamachère (1994) définit les EDS comme étant l'ensemble des caractéristiques que présentent la surface du sol. Ces caractéristiques sont : la couverture végétale, type de sol, organisations superficielles de surface et le taux d'humectation du sol.

Retenons que ces définitions se rejoignent en plusieurs points. Elles font ressortir les différentes caractéristiques à considérer dans la caractérisation des états de surface. Mais il faut noter que l'ensemble de ces caractéristiques sont proposés à une échelle d'observation locale et même quasi-ponctuelle. L'appréhension de la notion d'état de surface ne saurait être la même pour celui qui travaille à l'échelle de la parcelle que pour celui qui travaille sur un bassin versant. Les processus mis en jeu sont différents et ne sont pas perceptibles de la même façon. Il importe donc, à l'échelle de l'unité du bassin versant, de redéfinir le concept d'état de surface tout en faisant face aux défis de chercher des modalités qui sont pertinentes pour l'étude du ruissellement et de l'érosion mais aussi facile à cartographier avec l'outil ou l'approche retenue

(photographie aérienne, télédétection). Cette définition suppose une connaissance des grandes modifications du milieu. Les modalités devraient être faciles à utiliser et mesurables à grande échelle ; appréciables sur les années antérieures et intégrables dans divers modèles (Diello, 2007).

L'analyse de la zone du nord permet de mettre en évidence cinq modes de transformation du milieu qui sont (Figure 2) : la dégradation anthropique et climatique des sols, la mise en culture, la mise en jachère, la restauration des sols, aménagements hydroagricoles et urbanisation (Marchal, 1983; Diello, 2007).

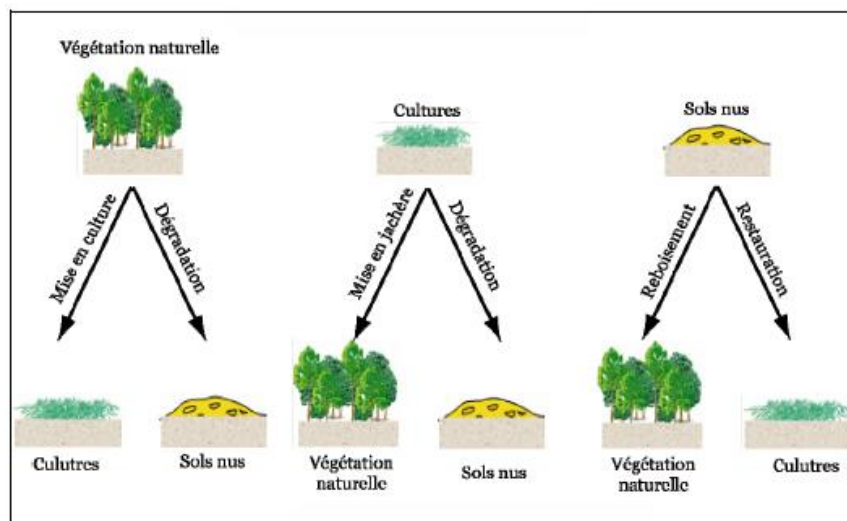


Figure 2 : Illustration des modes de transformation du milieu (Diello, 2007)

De cette analyse nous retiendrons trois grands ensembles qui s'interconvertissent entre eux. Ainsi nous pouvons dire que les états de surface dans le contexte sahélien peuvent être résumés en trois grands ensembles qui sont : les sols cultivés, dégradés et la végétation naturelle.

Les changements dans l'environnement biophysique sahélien sont notables et il était impérieux de pouvoir évaluer leur ampleur en vue d'y apporter des réponses appropriées (Sawadogo et al., 2008). Le SIG et la cartographie constituent incessamment un moyen privilégié pour l'analyse et la communication sur l'évolution du milieu naturel et sert à mieux comprendre l'espace et les paysages. Entre autres tentatives de cartographie dans le contexte sahélien nous résumons dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Exemple cartographies des états de surface

Auteur	Localisation	Périodes d'observation	Type d'EDS cartographié	Moyen d'observation	Résultats
(Louvet et al., 2012)	BANI/MALI	1986-2000	Sols nus ; Cultures ; Végétation naturelle	Télédétection	Augmentation des cultures de 50% ; Diminution de la végétation et des sols nus respectivement de 8% et 49%
(Lamachère, 1994)	KAZANGA/ BURKINA	1956 - 1980	Champs ; Jachère ; Savane arborée	Photographie aérienne et terrain	Augmentation des champs de 20% ; Diminution de la jachère et de la végétation de respectivement de 17.5 et de 2.5%
(Amogu et al., 2015)	TONDI KIBORO/ NIGER	1993-2007	Cultures ; sols nus ; Végétations	Photographies Aériennes	Augmentation de manière globale des surfaces cultivées
(Diello, 2007)	NAKAMBE/ BURKINA FASO	1972-2002	Cultures ; sols dégradés ; zones de végétation naturelles	Télédétection	Disparition de la végétation au profit des zones cultivé et dégradé avec une augmentation significative des zones cultivé de près de 20%.
(Marchal, 1983)	TUGU/ BURKINA FASO	1952-1973	Faciès du milieu	Photographies aériennes	Une réduction de la biomasse (bush) et de la jachère au profit des zones cultivé qui ont augmenté de près de 10%.
(Koussoubé, 2006)	TUGU/ BURKINA FASO	2007	Cultures ; sols dégradés ; zones de végétation naturelle	Terrain	Fortes zones cultivées estimé à près de 60%

Des différentes études de dynamique des états de surface, il ressort une panoplie d'outils de cartographie dont les plus récurrents sont les photographies aériennes et la télédétection qui sont parfois combinés dans le but de mieux cerner la dynamique. La télédétection et les systèmes d'information géographiques (SIG) sont des outils adéquats pour appréhender ces différents changements en particulier l'occupation du sol et la couverture végétale (Lambin, 1988; Nonguierma, Dautrebande, 2006) .

I.3. Télédétection

I.3.1. Définition et principes de télédétection

D'après le Centre Canadien de Télédétection (CCT) la télédétection est définie comme étant une technique qui par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information à la surface de la terre sans être en contact direct avec celle-ci. Elle permet la collecte des informations par le biais de mesures du rayonnement électromagnétique provenant des objets. Ceci est possible par le fait que les objets émettent ou réfléchissent des rayonnements différents en fonction des caractéristiques physicochimiques. La Figure 3 illustre cette différence à travers des signatures spectrales propres à chaque corps.

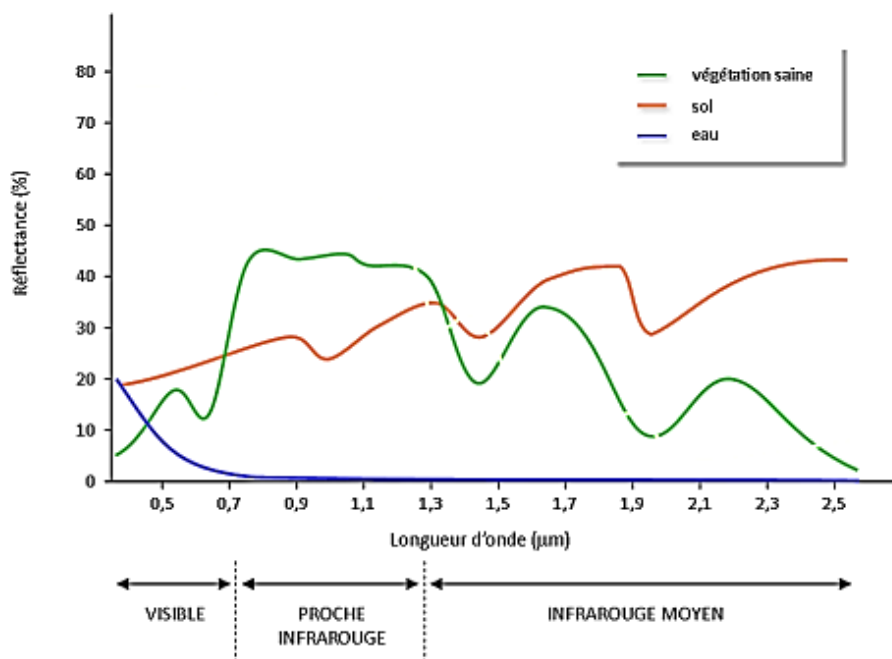


Figure 3 : Signatures spectrales de l'eau, le sol et la végétation

Le rayonnement solaire qui atteint la surface du sol est divisé en trois parties : une partie est réfléchie, une partie est absorbée, une partie est transmise.

L'énergie réfléchie est mesurée par des appareils spécialisés, les capteurs, à bord des plateformes aériennes ou spatiales. Une grille « imaginaire » projetée par le capteur sur la surface de l'objet permet de faire un échantillonnage spatial dans le but de faire une mesure localisée. Le flux d'énergie résultant de chaque surface élémentaire est ensuite évalué dans plusieurs longueurs d'ondes. Ces mesures prélevées sont codifiées suivant une échelle de niveau de gris de sorte qu'elles soient lisibles directement par ordinateur. Le principe général de fonctionnement est résumé à travers la Figure 4.

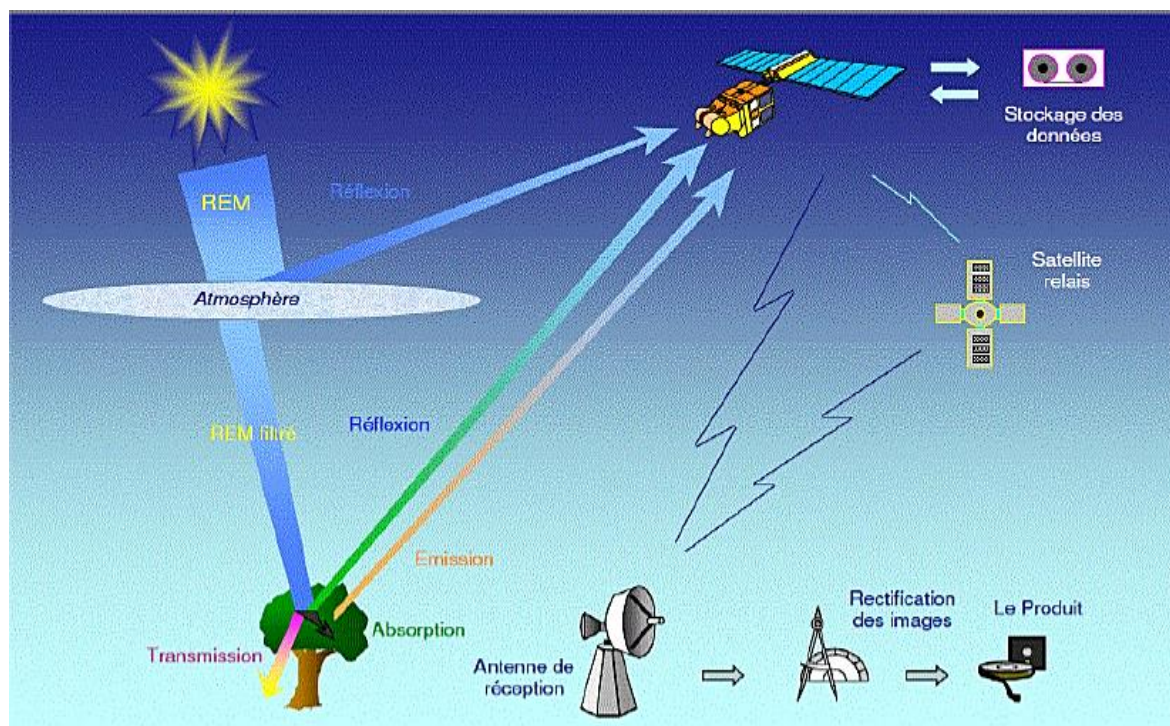


Figure 4 : Principe de fonctionnement de la télédétection

I.3.2. Quelques types de capteurs en télédétection

L'amélioration continue des capteurs de la télédétection répond à l'ambition de mener des études plus poussées sur certaines thématiques. Cette évolution est marquée par de nouvelles générations de capteurs permettant de visionner des éléments plus petits. Le Tableau 3 fait l'inventaire des capteurs les plus récents à usage civil.

Tableau 3 : Quelques capteurs en télédétection

Type de capteur	Bandes	Résolution	Temporalité	Accessibilité
Worldview	PAN+4MS	0.31/1.24m	1 jour	Commercial
GeoEye	PAN+MS	0.41/1.65m	2.1 jours	Commercial
Quickbird	PAN+MS	0.61/2.44m	2.1 jours	Commercial
IKONOS	PAN+MS	0.82/3.2m	3 jours	Commercial
ALOS	PAN+MS	2.5/10m		Commercial
SPOT7	PAN+MS	1.5/6m		Commercial
ASTER	3 MS + 6 SWIR + 5 TIR (6)	15/30m		Libre
LANDSAT8	Pan + 6 MS + 2 SWIR + 2 TIR	15/30m	16 jours	Libre

I.3.3. Avantages et limites de la télédétection

La télédétection est un outil pertinent pour l'évaluation et la surveillance de l'environnement, la détection et la surveillance des changements globaux et la cartographie car elle offre une vision répétitive et synoptique. Elle donne la possibilité de suivre qualitativement et quantitativement et de cartographier les changements depuis plusieurs années en arrière. Elle donne un aperçu de la nature, de l'ampleur et de la célérité des modifications qui ont lieu (Nonguierna, Dautrebande, 2006). En plus ces études peuvent être faites à différentes échelles au vu de la multitude de capteurs de résolution différentes. Elle offre des solutions qui sont souvent plus économiques que les moyens traditionnels et bénéficie d'une intégrité, d'une objectivité qui en font un arbitre impartial. Elle reste la seule méthode pour traiter des problèmes qui ne peuvent être résolus par des moyens classiques (endroit inaccessible). Les multiples avantages ne cachent point les difficultés vécues dans l'utilisation des produits de cette science. L'une des limites se trouve dans sa méthode d'acquisition d'images. Il s'agit là des difficultés liées à l'interférence entre rayonnements électromagnétique et atmosphère mais aussi la difficulté d'obtenir une information du type d'occupation du sol dans les zones végétalisées. A cela s'ajoute l'indisponibilité et/ou la mauvaise qualité des données antérieures. Toutes ces limites posent le problème du choix d'un capteur qui devrait se faire suivant l'échelle d'observation, les éléments à étudier et la période sur laquelle porte l'étude.

I.3.4. Le capteur Landsat

Le programme Landsat est le premier programme spatial d'observation de la Terre destiné à des fins civiles. Il est développé par l'agence spatiale américaine, la NASA. Huit satellites Landsat avec différentes caractéristiques (Tableau 4) ont été lancés depuis 1972 dont le dernier date du 11 février 2013.

Tableau 4 : Les générations de capteurs LANDSAT depuis 1972

Landsat 1 à 3 (MSS)			Landsat 4 et 5			Landsat7			Landsat8		
MSS			TM			ETM+			ETM+		
1972-1983			1975-2013			1999 à nos jours			2013 à nos jours		
Fréquence de passage : 18jours			Fréquence de passage : 16jours			Fréquence de passage : 16jours			Fréquence de passage : 16jours		
Nom de bandes	Spectral	Résolution	Nom de bandes	Spectral	Résolution	Nom de bandes	Spectral	Résolution	Nom de bandes	Spectral	Résolution
Bande4-Green	0.5–0.6	60m	Bande1-Blue	0.45–0.52	30m	Bande1-Blue	0.45–0.52	30m	Bande1-Ultra	0.43–0.45	30m
Bande5-Red	0.6–0.7	60m	Bande2-Green	0.52–0.60	30m	Bande2-Green	0.52–0.60	30m	Bande2-Blue	0.45–0.51	30m
Bande6-NIR	0.7–0.8	60m	Bande3-Red	0.63–0.69	30m	Bande3-Red	0.63–0.69	30m	Bande3-Green	0.53–0.59	30m
Bande7-NIR	0.8–1.10	60m	Bande4-NIR	0.76–0.90	30m	Bande4-NIR	0.77–0.90	30m	Bande4-Red	0.64–0.67	30m
			Bande5-SWIR	1.55–1.75	30m	Bande5-SWIR	1.55–1.75	30m	Bande5-NIR	0.85–0.88	30m
			Bande7-SWIR2	2.08–2.35	30m	Bande7-SWIR2	2.09–2.35	30m	Bande6-SWIR1	1.57–1.65	30m
						Bande8-PAN	0.52-0.70	15m	Bande7-SWIR2	2.11-2.29	30m
									Bande8-Pan	0.50-0.68	15m
									Bande9-circus	1.36-1.38	30m
			Bande6-TIR	10.40–12.50	120m	Bande6-1-TIR	10.40–12.50	60m	Bande10-1-TIR	10.60–11.19	100m
						Bande6-2-TIR	10.40–12.51	60m	Bande10-2-TIR	11.50–12.51	100m

II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Présentation du cadre de l'étude

II.1.1. Le cadre physique :

Le site d'étude est un bassin versant de superficie de 37 Km² regroupant trois villages que sont : Tougou, Faogodo et Basnére. L'exutoire du bassin versant se trouve à Tougou village situé à 22 Km de Ouahigouya dans la province du YATENGA (Figure 5). Il est accessible à travers la route National n° 23 sur l'axe Ouahigouya-Djibo. Ce sous bassin du NAKAMBE est circonscrit entre les coordonnées géographiques 13°11' et 13°26' de latitude Nord et entre 2°6' et 2°24' de longitude Ouest.

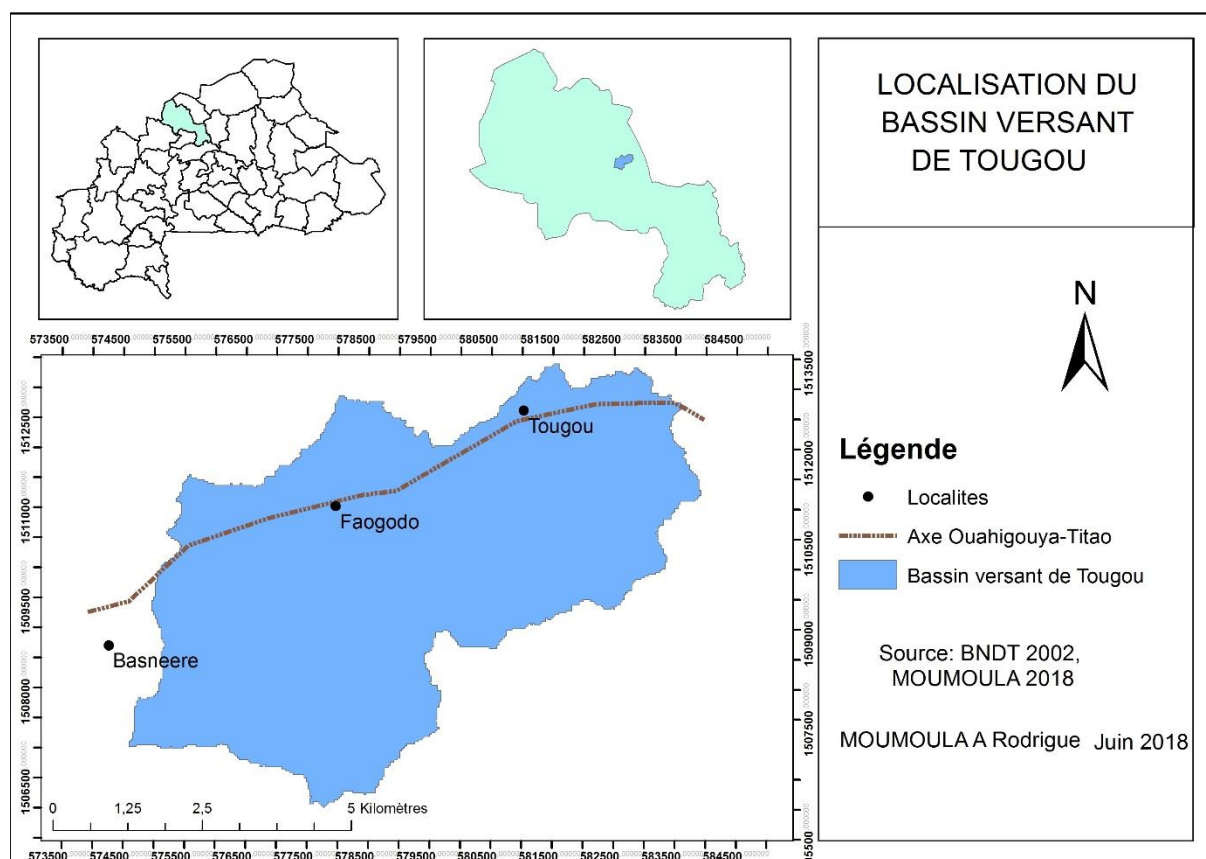
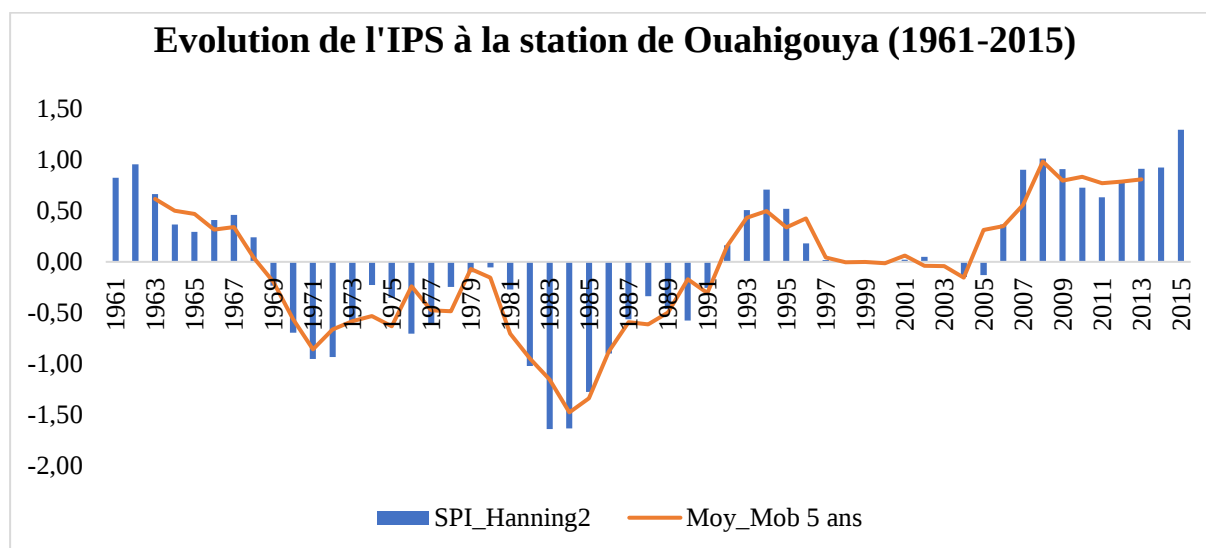


Figure 5 : Localisation du bassin versant de Tougou

La localisation géographique du bassin versant de Tougou le place dans la zone sahélienne de climat semi-aride, à cause des précipitations moyennes largement inférieures à l'évapotranspiration (Thiombiano, Kampmann, 2010). Le climat caractéristique de cette zone est marqué par le déplacement du Front Inter Tropical (FIT) qui permet de dissocier deux saisons : une saison sèche et une saison humide (Thiombiano, Kampmann, 2010).

Située entre les isohyètes 550mm et 750mm de précipitations annuelles, la température moyenne est de 35°C (Koussoubé, 2006). L'analyse des données pluviométrique de 1961 à 2015 montre de fortes variations et même des périodes de sécheresses. La Figure 6 présente l'évolution l'Indice de Précipitation Standardisé (IPS) à la station de Ouahigouya sur la période de 1961 à 2015. Un filtre de Hanning non récursif, d'ordre 2, passe bas a été appliqué sur la série afin de mettre en exergue les périodes excédentaires et déficitaires.



$SPI_Hanning2 = \text{Indice de précipitation standardisé Ordre 2} / \text{Moy_Mob 5 ans} = \text{Moyenne Mobile 5 ans}$

Figure 6 : Evolution de l'IPS à la station de Ouahigouya (1961-2015)

Le bassin versant de Tougou possède un réseau hydrographique peu dense (Mounirou, 2012) à écoulement temporaire (Diello, 2007) à l'image de la zone sahélienne. Les cours d'eau essentiellement constitués de ruisseaux, de rigoles et de ravines canalisent les eaux vers la branche principale qui est une rivière (Figure 7). Un chenal principal, le *bilampoanga*, long de 8 km, draine l'ensemble du bassin à son exutoire, avant de déverser ses eaux dans le barrage de Tougou.

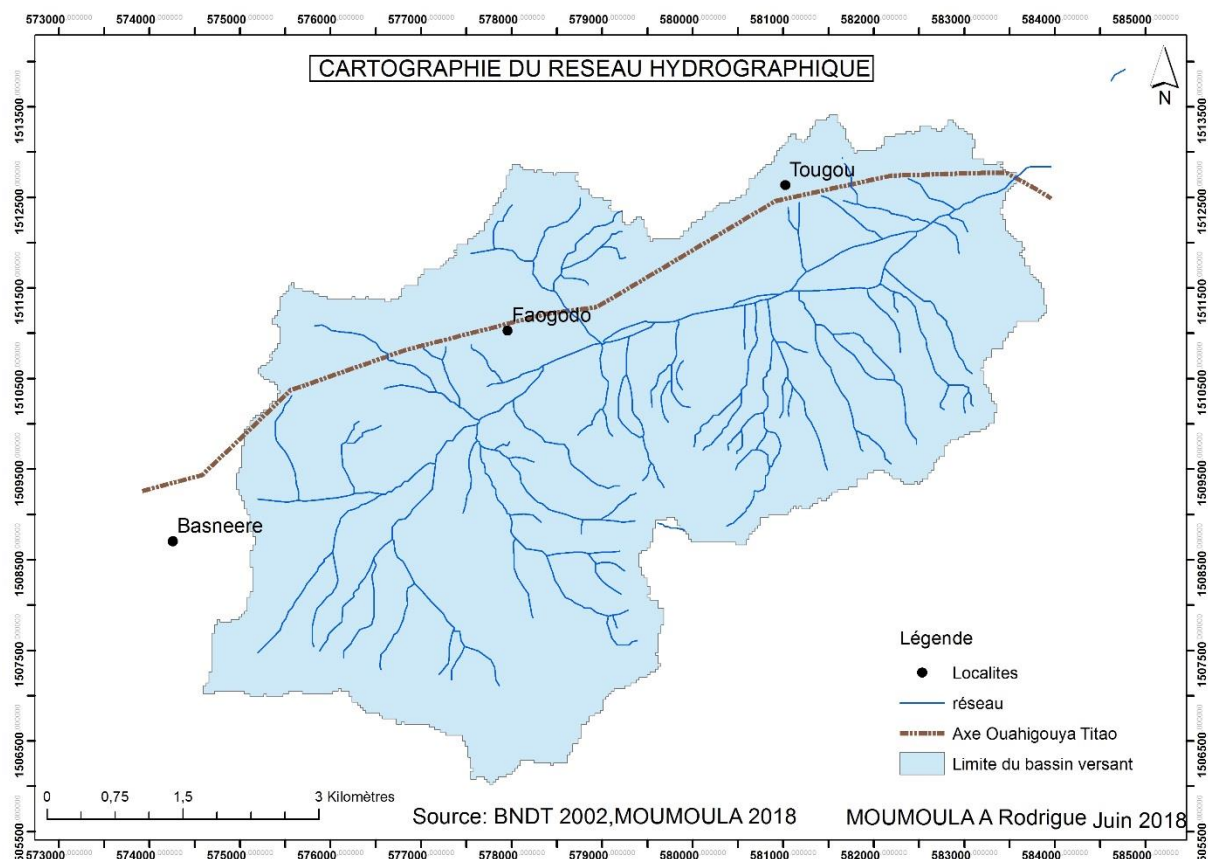


Figure 7 : Réseau hydrographique du bassin versant de Tougou

Le paysage du bassin de Tougou présente un relief très peu accidenté avec une altitude moyenne de 340 m, un point bas de 315m et un point culminant de 370m (Figure 8). Le relief est constitué par des buttes et/ou des collines cuirassées et les glacis représentatifs des surfaces fonctionnelles (BUNASOLS, 2004). Les buttes constituent l'essentiel du relief et présentent des formes variables en fonction de la force du principal agent de l'érosion qu'est l'eau. Les collines, quant à elles, sont des reliefs plus ou moins circulaires, présentant des versants moins entaillés que ceux des buttes (Mounirou, 2012; Maiga-Yaleu, 2014). Le substratum géologique du bassin versant est constitué essentiellement par des affleurements de roches acides tels que les granites, les migmatites et les gneiss.

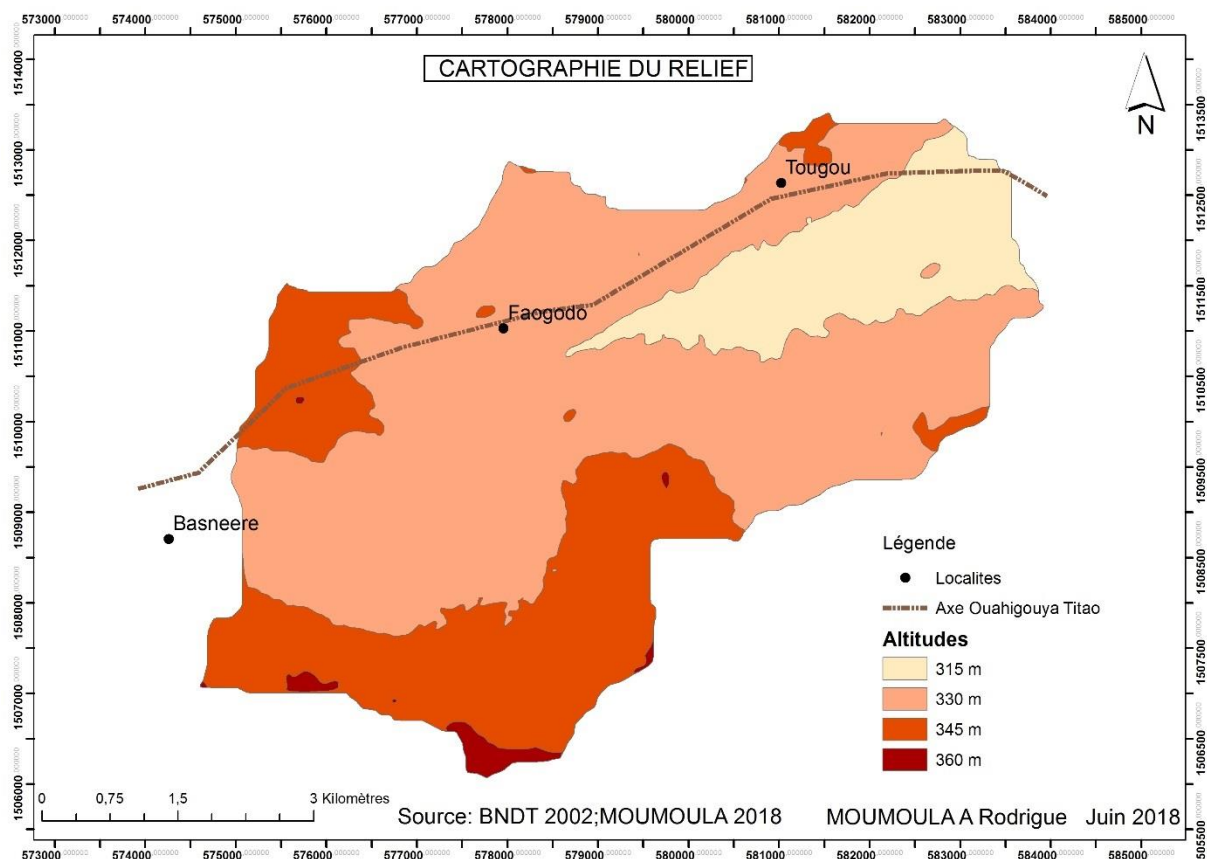


Figure 8 : Le relief du bassin versant de Tougou

Parmi les différents types de sols identifiés au Burkina Faso, trois (3) sont principalement rencontrés dans le bassin de Tougou : les sols ferrugineux tropicaux lessivés, les lithosols et les sols peu évolués (Figure 9). Ces sols se développent sur un substratum géologique constitué essentiellement des cuirasses ferrugineuses et des matériaux de type kaolinique issus des roches acides tels que les granites, les migmatites et les gneiss (BUNASOLS, 2004).

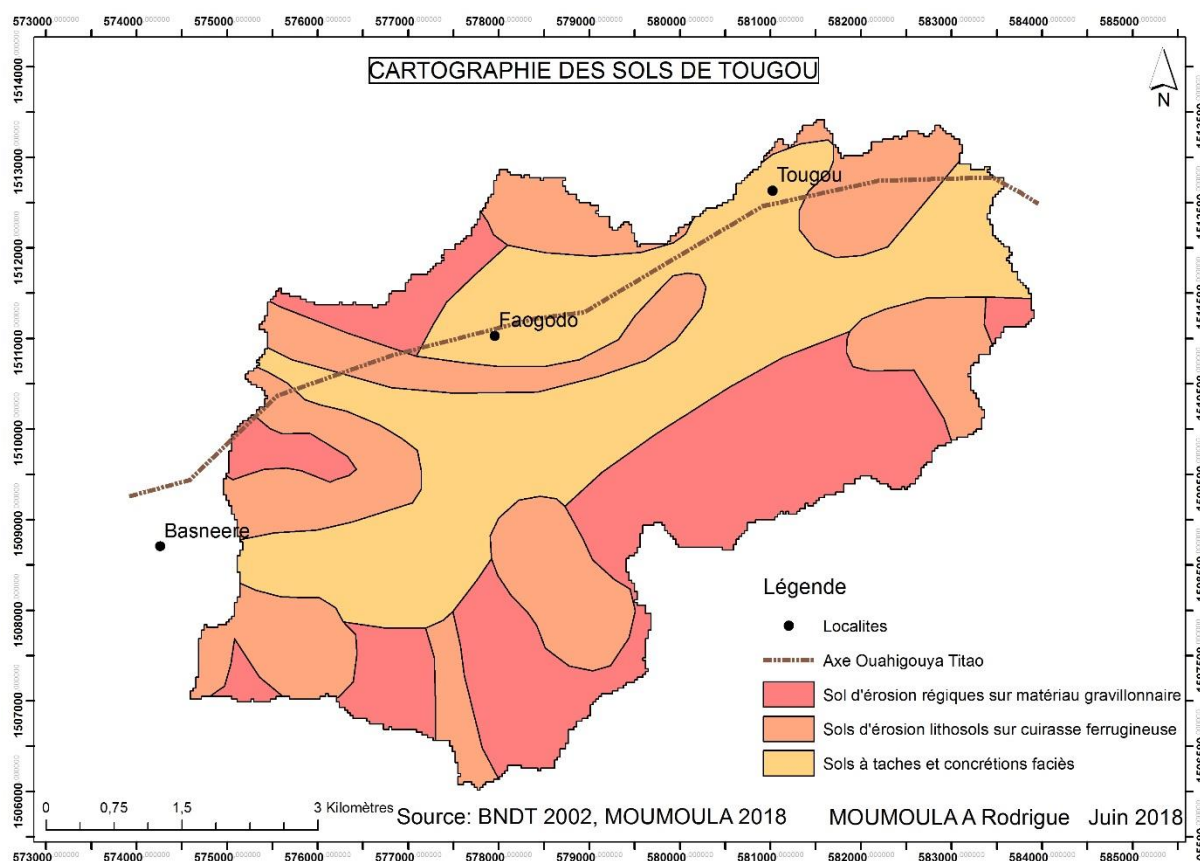


Figure 9 : Les sols de Tougou

Le bassin versant de Tougou est localisé dans le domaine sahélien et le principal type de végétation dans ce domaine est la steppe qui est constituée de plantes de type ligneuses et graminéennes (Thiombiano, Kampmann, 2010). Le tapis herbacé, constitué d'espèces annuelles, est discontinu et de taille basse, inférieure à 80 cm de hauteur (Thiombiano, Kampmann, 2010).

II.1.2. Le cadre humain

Le bassin versant de Tougou formé par trois villages a connu une augmentation de la population de 1952 à nos jours. En effet, passant de 2920 habitants en 1952 (Marchal, 1983) à 7089 en 2004 (INSD, 2008). Le bassin a connu une augmentation de la population commune à la zone sahélienne qui est de 3% par an. Cela traduit une forte humanisation du milieu depuis les années 1950 (Marchal, 1983). Cette augmentation ne peut occulter les différentes migrations qui conduit à une diminution de la population autour des années 1970 (Marchal, 1983). Le Tableau 5 montre l'évolution de la population de Tougou de 1952 à 2004.

Tableau 5 : Evolution de la population à Tougou de 1952 à 2004

Année	1952	1960	1963	1970	1975	2004
Population	2920	3728	3592	4555	4322	7089

L'agriculture (céréalière) et l'élevage (gros et petits ruminants) demeurent les principales activités économiques de production (Somé et al., 2011; Mounirou, 2012). L'agriculture est très diversifiée car les paysans produisent entre 7 à 9 spéculations. En grande majorité pluviale elle connaît une faible utilisation d'intrant agricole (Somé et al., 2011). Le barrage de Tougou permet aussi la réalisation d'autres activités comme la pêche et l'irrigation (Mounirou, 2012). La Base de Donnée d'Occupation des Terres (BDOT) est un guide indispensable à la compréhension de l'évolution des différentes classes d'occupation du sol. Elle met à disposition deux cartes d'occupation du sol (1992,2002) sur toute l'étendue du territoire burkinabè. Cela permet d'appréhender la dynamique de notre zone d'étude (Figure 10) entre les années 1992 et 2002.

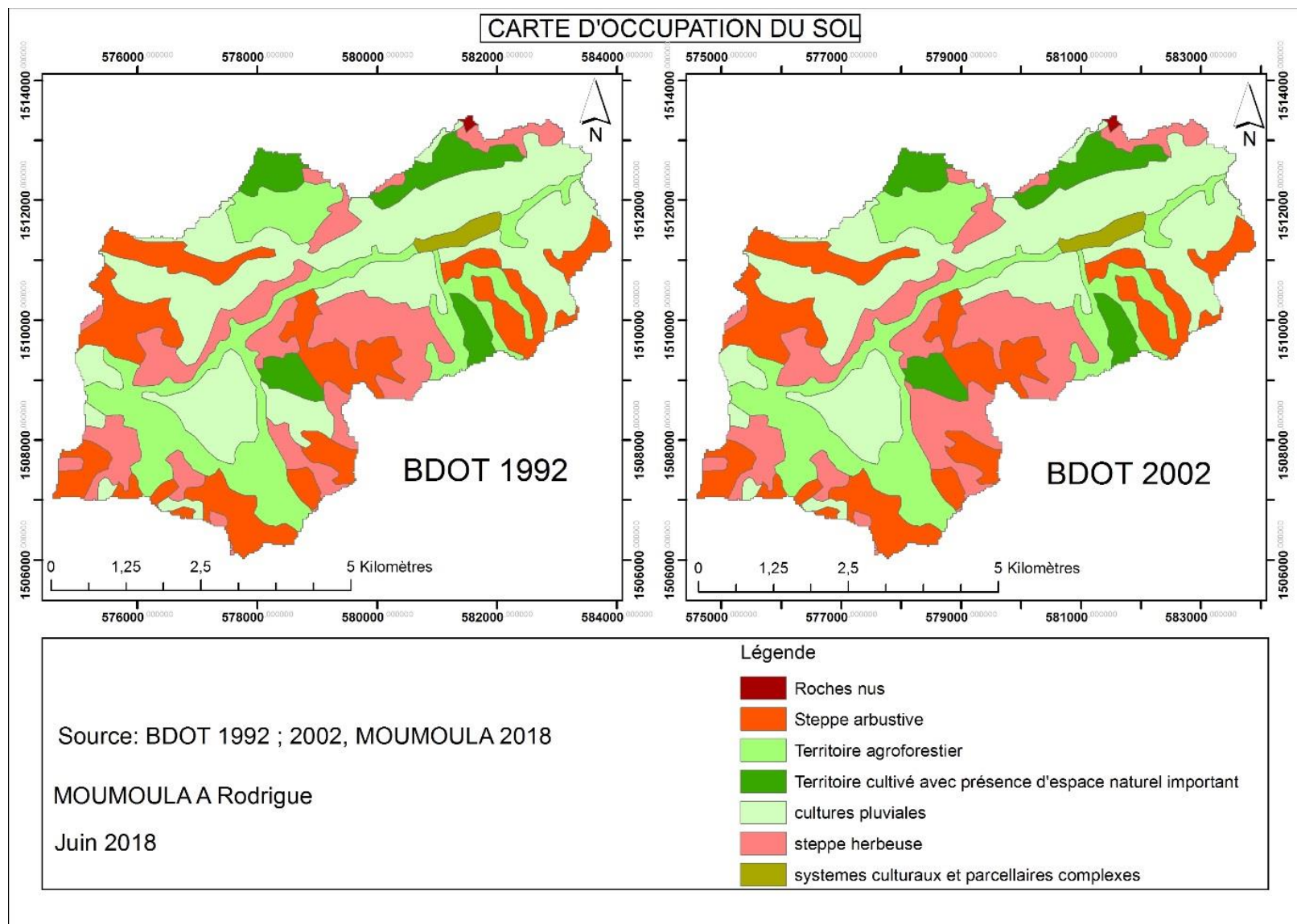


Figure 10 : Occupation des sols de Tougou (BDOT,1992-2002)

II.1.3. Les travaux antérieurs

Le bassin versant a fait l'objet de plusieurs études de recherche qui ont contribué à caractériser l'évolution spatiotemporelle du bassin versant de Tougou. En effet, Marchal (1983), depuis les années 1950 s'est intéressé à la dynamique spatiotemporelle du bassin versant de Tougou qu'il considérait être une unité représentative du contexte sahélien. Une dynamique qu'il a liée aux actions anthropiques et climatiques. Les faits les plus marquants de cette évolution sont la nette diminution de la végétation, l'augmentation des surfaces cultivées et des sols nus entre 1952 et 1973. Diello (2007), sur un domaine plus large qu'est le NAKAMBE, a confirmé la dynamique de Marchal (1983). Koussoubé (2006), à l'aide de la BDOT et de travaux complémentaires de terrain a étudié la dynamique du couvert végétal et de la production agricole. Ce qui permet d'avoir une vue assez claire sur les formations végétales du paysage de Tougou. Enfin Mounirou (2012) a pu effectuer des mesures de ruissellement et d'érosion sur ces unités homogènes en termes d'occupation du sol permettant ainsi de caractériser l'aptitude au ruissellement et à l'érosion des différents états de surfaces identifiés sur le bassin qui sont : les sols cultivés, dégradés et en végétation.

II.2. Méthodologie pour la cartographie des états de surface

II.2.1. La notion d'état de surface

La notion d'état de surface a été dans plusieurs études liée aux différents types d'occupation du sol au regard de l'échelle d'étude et de la dynamique du milieu. Les études de Marchal (1983) et Diello (2007) ont pu mettre en évidence trois grands indicateurs d'évolution du milieu :

-**Sols cultivés** qui sont toutes surfaces connaissant un travail de la terre suivant une technique culturale bien spécifiées (jachère non compris) ;

-**Sols dégradés** : qui représentent toutes la surface non utilisée à des fins agropastorales et ayant une faible densité recouvrement du sol sensibles aux actions climatiques (battance, érosion, ruissellement).

On y retrouve les sols dégradés, les habitats, les pistes, les affleurements rocheux etc.

-**La végétation naturelle** qui est l'ensemble des plantes qui poussent en un lieu donné selon leur nature. Sera considérée comme zone à végétation naturelle, les zones dont le taux de recouvrement du sol supérieur à 20%.

II.2.2. Diagramme méthodologique de cartographie d'états de surface

Une bonne cartographie des états de surface suppose la mise en place d'une technique d'analyse des images et le suivi d'indicateurs biophysiques pertinents (Sawadogo et al., 2008). Dans notre contexte de travail, les modalités d'états de surface fluctuent au cours de la saison. La Figure 11 montre la méthodologie adoptée pour mieux cerner pour la période idéale et l'algorithme optimal de cartographie et produire une carte d'états de surface pour 2017.

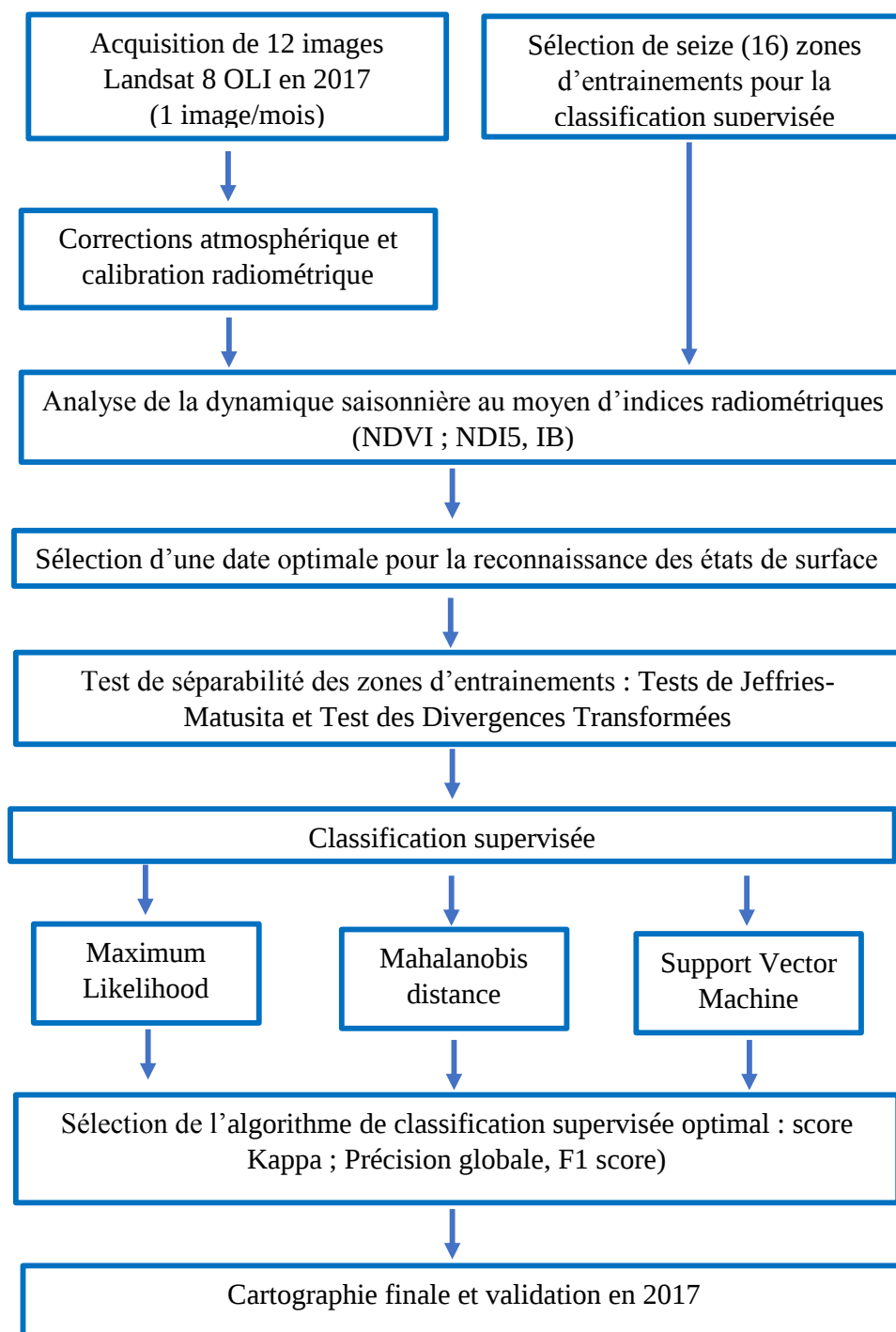


Figure 11 : Diagramme méthodologique de la cartographie des états de surface

II.2.3. Chronogramme d'activités

Tableau 6 : Chronogramme d'activités

Taches	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Sélection de zones d'entrainements												
Sélection et observation des points de validation												
Acquisition des images LANDSAT												
Traitements correctifs et calibration radiométrique												
Analyse de la dynamique saisonnière au moyen d'indices radiométriques												
Sélection d'une date optimale pour la reconnaissance des états de surface												
Test de séparabilité des zones d'entrainements												
Classification supervisée												
Sélection de l'algorithme de classification supervisée optimal												
Cartographie finale et validation												
Analyse diachronique												
Rédaction du mémoire												

12 images Landsat 8 OLI (1 pour chaque mois) ont été acquises sur via la plate-forme Earth Explorer de l'United States Geological Survey (USGS). La sélection a été effectuée de manière à éviter les images avec un taux de couverture nuageuse supérieur à 10%. Ces images ont subi des corrections atmosphériques par l'algorithme 6S (Vermote et al., 1997) afin d'éliminer les signaux atmosphériques pouvant impacter la qualité des images.

La phase de calibration radiométrique qui a suivie permet de convertir les comptes numériques présents dans chaque pixel de l'image en une valeur de réflectance au sol (équation 1), valeur ayant une interprétation physique.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN \sin(\theta)} \quad \text{Eq.1.}$$

- L_{λ} = est la luminance en $W/(m^2.sr.\mu m)$
- d = Distance terre soleil en unités astronomiques
- $ESUN$ = Le rayonnement solaire en $W/(m^2.\mu m)$
- θ = Angle zénithal solaire déduite de l'angle d'élévation du soleil lors de la prise de vue

Les zones d'entraînement sont en effet un lot de pixels représentant une classe thématique donnée devant permettre une bonne discrimination statistique (Hepner et al., 1990; McCaffrey, Franklin, 1993). Plusieurs études ont montré l'importance de la taille des sites d'entraînement dans la performance de la classification (Foody et al., 1995; Arora, Foody, 1997; Foody, Mathur, 2004). Elles doivent être réparties pour tenir compte de la variabilité du milieu (Foody, Mathur, 2004). De manière pratique, nous avons délimité à partir d'un GPS des polygones (1 ha minimum) propre à chaque état de surface selon le taux d'échantillonnage voulue.

Le test de séparabilité des zones d'entraînement est un test statistique utilisé pour déterminer le niveau de séparabilité entre deux thématiques (Richards, 1999). La valeur du test déterminée par la méthode de *Jeffries-Matusita* et de la *divergence transformée* est comprise entre 0 et 2. Une valeur supérieure à 1,9 traduit une très bonne séparabilité tandis qu'une inférieure à 1 montre de forte similarité.

Au cours de la saison de pluie, les états de surface présentent une variabilité. En effet sur un même site des caractères comme le taux d'humectation du sol et la couverture végétale varie énormément au cours de la saison hivernale (Lamachère, 1994).

- ❖ Les sols cultivés qui connaissent une évolution de la structure et la couverture du sol durant la saison des pluies. Ces sols sont sarclés et recouverts par des cultures dû à la germination.
- ❖ Les sols dégradés quant à eux connaissent un développement assez faible de tapis herbacé.
- ❖ Les arbres, subissent de nombreux changements au cours d'une année liés à leur adaptation aux besoins des arbres et à la rigueur du climat (Koussoubé, 2006).

Toutes ces variations influent sur les valeurs radiométriques des images satellitaires comme le montre les compositions colorées (PIR ; R ; V) de la Figure 12 :

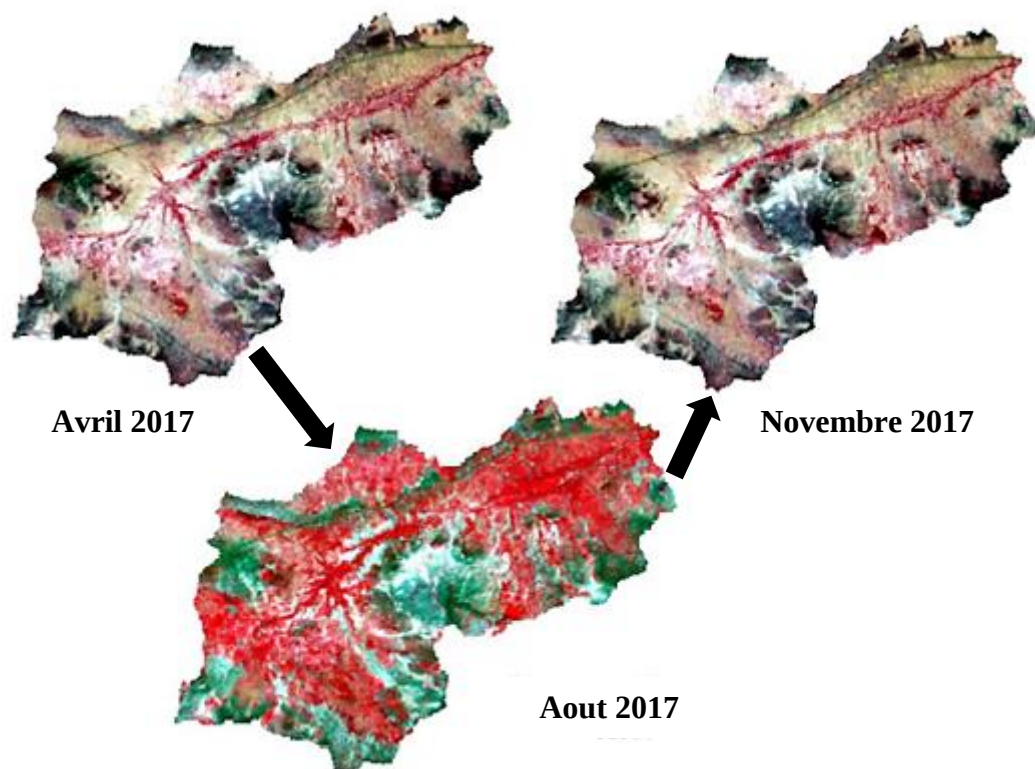


Figure 12 : Illustration des images radiométriques à différentes dates

Pour éviter le maximum de confusion entre les classes thématiques d'intérêt, nous avons cherché à déterminer moment (optimal) de l'année où les signatures de ces classes étaient au maximum différentes, en suivant l'évolution dans l'année d'indices radiométriques. Les trois indices retenus, l'un pour le plan de la végétation (NDVI), l'autre pour le plan des cultures (NDI5) et le dernier pour le plan des sols (IB). Ces indices sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Indices radiométriques utilisés pour la dynamique saisonnière

Indice	Auteur	Formule	Propriété
NDVI	(Rouse Jr et al., 1973)	$(PIR-R) / (PIR+R)$	Forte corrélation avec l'activité chlorophyllienne
NDI5	(McNairn, Protz, 1993)	$(R-PIR) / (R+PIR)$	Sensible aux résidus de culture
IB	(Ghram-Messedi, Delaître, 2007)	$\sqrt{V^2 + R^2 + PIR^2}$	Rend compte de l'albédo et permet de dissocier les zones végétalisées des sols nus.

À la date optimale retenue, la cartographie des états de surface a été effectuée par classification supervisée. Trois algorithmes ont été comparés :

- ❖ **Maximum de Vraisemblance** (*Maximum Likelihood*) : cet algorithme suppose une statistique distribuée pour chaque classe et calcule la probabilité d'appartenance de chaque pixel à une classe spécifique (Richards, 1999), suivant l'équation 2.

$$g_i = \ln p(w_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \quad \text{Eq.2.}$$

Où : i = Nombre de classes ; x = Nombre de dimension des données (Nombre de bandes) ;

$p(w_i)$ = Probabilité qu'un pixel w_i appartienne à une classe

$|\Sigma_i|$ = Déterminant de la matrice de covariance des données propres aux classes w_i

Σ_i^{-1} Inverse de la matrice

m_i Vecteur moyen

- ❖ **Distance de Mahalanobis** : cet algorithme fonctionne de la même manière que l'algorithme du Maximum de Vraisemblance, mais elle suppose que toutes les covariances sont égales (Richards, 1999).

$$D_i(x) = \sqrt{(x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i)} \quad \text{Eq.3.}$$

i = Nombre de classe ; x = Nombre de dimension des données (Nombre de bandes)

Σ_i^{-1} Inverse de la matrice

m_i Vecteur moyen

- ❖ **Support Vector Machine** (machine à support de vecteurs): sont un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé procédant à la classification par discrimination et par régression.

La validation des cartographies a été effectuée avec des points de contrôle collectées de manière aléatoire sur le bassin. Ces points serviront à établir la matrice de confusion (Tableau 8) à partir de laquelle le Kappa, la précision globale, les erreurs de commission et d'omission et le F1 score sont évalués.

MATRICE DE CONFUSION

		Point de validation terrain			
		A	B	C	Somme
Pixel classé	A	P _{AA}	P _{AB}	P _{AC}	P _{A+}
	B	P _{BA}	P _{BB}	P _{BC}	P _{B+}
	C	P _{CA}	P _{CB}	P _{CC}	P _{C+}
	Somme	P _{+A}	P _{+B}	P _{+C}	P

Tableau 8 : Matrice de confusion

$$\text{Précision globale} = \frac{\sum_{k=1}^q P_{kk}}{P}$$

$$\text{Précision utilisateurs} = \frac{P_{kk}}{P_{k+}}$$

$$\text{Précision productrice} = \frac{P_{kk}}{P_{+k}}$$

$$\text{Kappa coef} = \frac{n \sum_{K=1}^q P_{kk} - \sum_{K=1}^q P_{k+} P_{+k}}{P^2 - \sum_{K=1}^q P_{k+} P_{+k}}$$

$$F_1 \text{ score} = \frac{2 \times \text{Précision utilisateur} \times \text{précision producteur}}{\text{Précision utilisateur} + \text{précision producteur}}$$

II.3. Méthodes d'analyse diachronique

Dans cette partie, nous avons conduit une méthodologie similaire pour établir les cartes d'états de surfaces à des dates antérieures, tout en respectant au mieux une temporalité de 10 ans entre deux dates. Les dates retenues sont 1986, 1999, 2009 et 2017.

Pour analyser la dynamique des états de surface entre les dates de cartographie, une matrice de cross-tabulation a été établie pour chaque intervalle, fondamentale dans l'analyse de la dynamique du milieu (Pontius et al., 2004). Les changements nets entre les différentes dates et suivants les différents états de surface ont été quantifiés. Afin de mieux capturer la variabilité du milieu, les gains et pertes, définissant ces changements nets ont aussi été déterminés et analysés. Les taux de variation annuels des états de surface entre chaque intervalle d'étude ont été calculés et comparés à un taux de variation moyen entre 1986 et 2017 afin de déceler les changements rapides et lents.

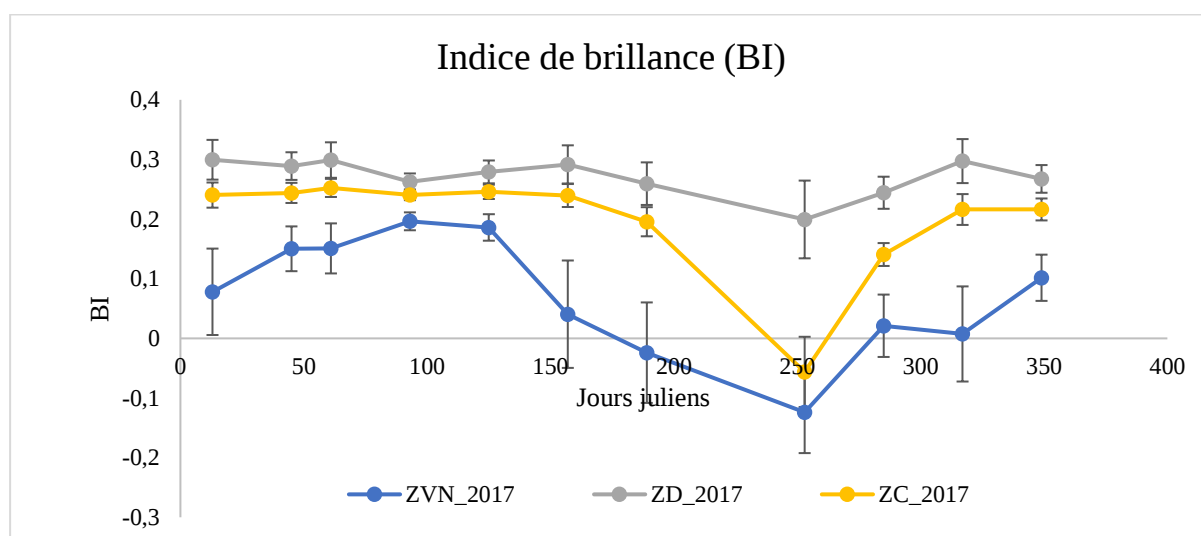
Les cartes montrant les changements et transitions d'états de surface ont été réalisées sous Idrisi TerrSet (de ClarkLabs).

III. RESULTATS

III.1. L'analyse de la dynamique saisonnière

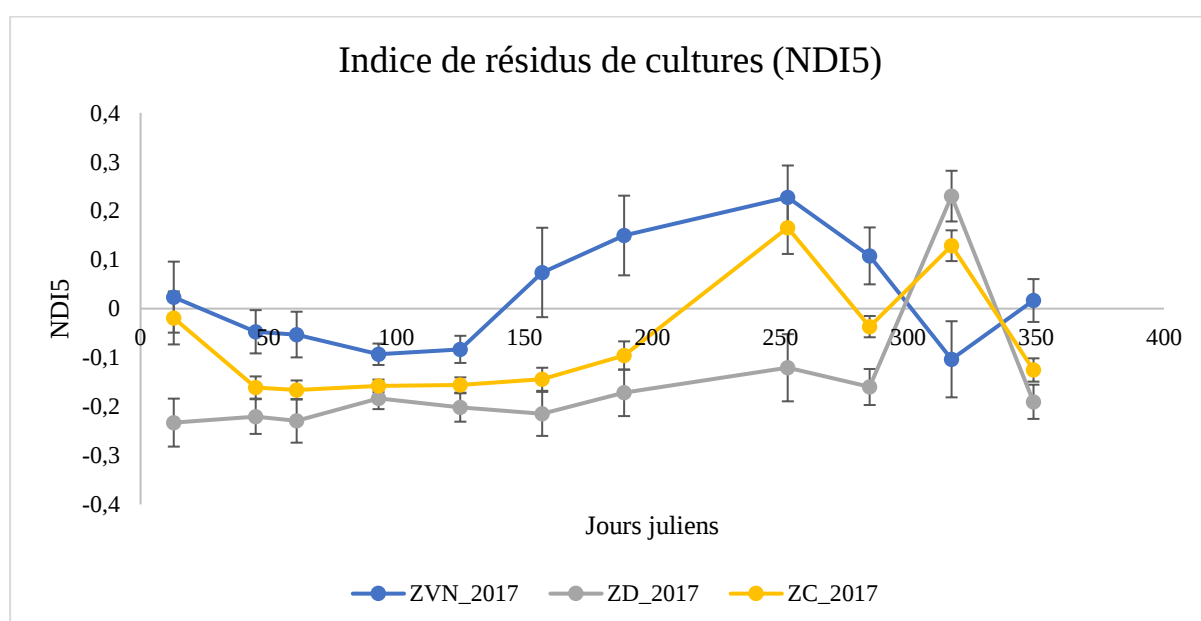
Les travaux de terrain ont permis délimiter seize (16) polygones pouvant servir de sites d'entraînement. Avec un taux d'échantillonnage de 0.1% du bassin, ils sont repartis sur l'ensemble du bassin versant de sorte à prendre en compte l'hétérogénéité du milieu.

Les sites d'entraînements ont permis d'établir à partir des indices calculés sur la base des images Landsat 8 OLI trois courbes (Figure 13, Figure 14, Figure 15) montrant la dynamique intra-saisonnière du milieu de l'année 2017.



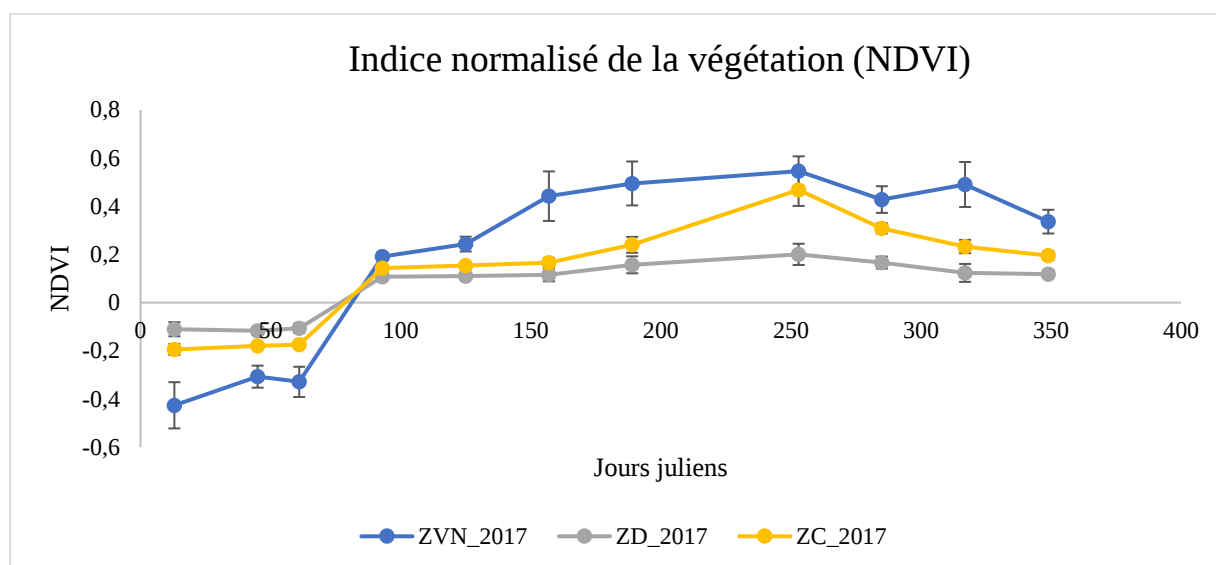
ZVN_2017 : Zones en végétation naturelle / ZD_2017 : Zones dégradées / ZC_2017 : Zones cultivées

Figure 13 : Illustration de la dynamique saisonnière de l'indice de brillance



ZVN_2017 : Zones en végétation naturelle / ZD_2017 : Zones dégradées / ZC_2017 : Zones cultivées

Figure 14 : Illustration de la dynamique saisonnière NDI5



ZVN_2017 : Zones en végétation naturelle / ZD_2017 : Zones dégradées / ZC_2017 : Zones cultivées

Figure 15 : Illustration de la dynamique saisonnière du NDVI

Les trois courbes nous permettent de faire trois remarques :

- ❖ **De décembre à mai** : la végétation naturelle se distingue nettement des zones dégradées et cultivées qui sont eux-mêmes confus.
- ❖ **De juin à septembre** : les zones dégradées à leur tour se distinguent des zones cultivées et des zones à végétation naturelle qui présentent aussi une confusion sur la même période.
- ❖ **D'octobre à novembre** : une bonne séparation des trois états de surface.

La période optimale se trouve se trouve autour de la fin du mois d'octobre ou début novembre. Les tests de séparabilités effectués sur ce mois ont permis d'obtenir les résultats résumés dans le Tableau 9 :

Tableau 9 : Résultats des tests de séparabilités

	Dégradé		Cultivé		Végétation	
	Jeffries-Matusita	Transformed Divergence	Jeffries-Matusita	Transformed Divergence	Jeffries-Matusita	Transformed Divergence
Dégradé	-	-	1.99229	1.9999	1.9992	1.9999
Cultivé	1.9922	1.9999	-	-	1.9878	1.9999
Végétation	1.9992	1.9999	1.9878	1.9999	-	-

L'application des trois algorithmes sur l'image de novembre a permis de produire trois cartes thématiques. L'analyse des critères de précision sélectionnés (score kappa, précision globale, F1 score) ont permis d'identifier l'algorithme *Distance de Mahalanobis* comme étant celui produisant le minimum de biais de cartographie. Ces scores sont récapitulés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Score de performance des différents algorithmes

	Distance de Mahalanobis	Maximum de vraisemblance	Support Vector Machine
Score Kappa	0,837	0,579%	0,817
Précision globale	91,87%	76,47%	90,47%
F1 Score en zone dégradée	79,0%	75,4%	85.6%
F1 Score en zone cultivée	81,6%	76,4%	90.2%
F1 Score en zone en végétation	86,7%	89,7%	100%

Les données du Tableau 10 montrent la supériorité en termes de précision de la Distance de Mahalanobis pour la discrimination des états de surface. Cet algorithme a été retenu pour la l'établissement de la cartographie définitive des états de surface à toutes les dates. La Figure 16 : Carte des états de surface à Tougou en 2017 montre la carte des états de surface en 2017 sur le bassin versant de Tougou avec la répartition des points de validation.

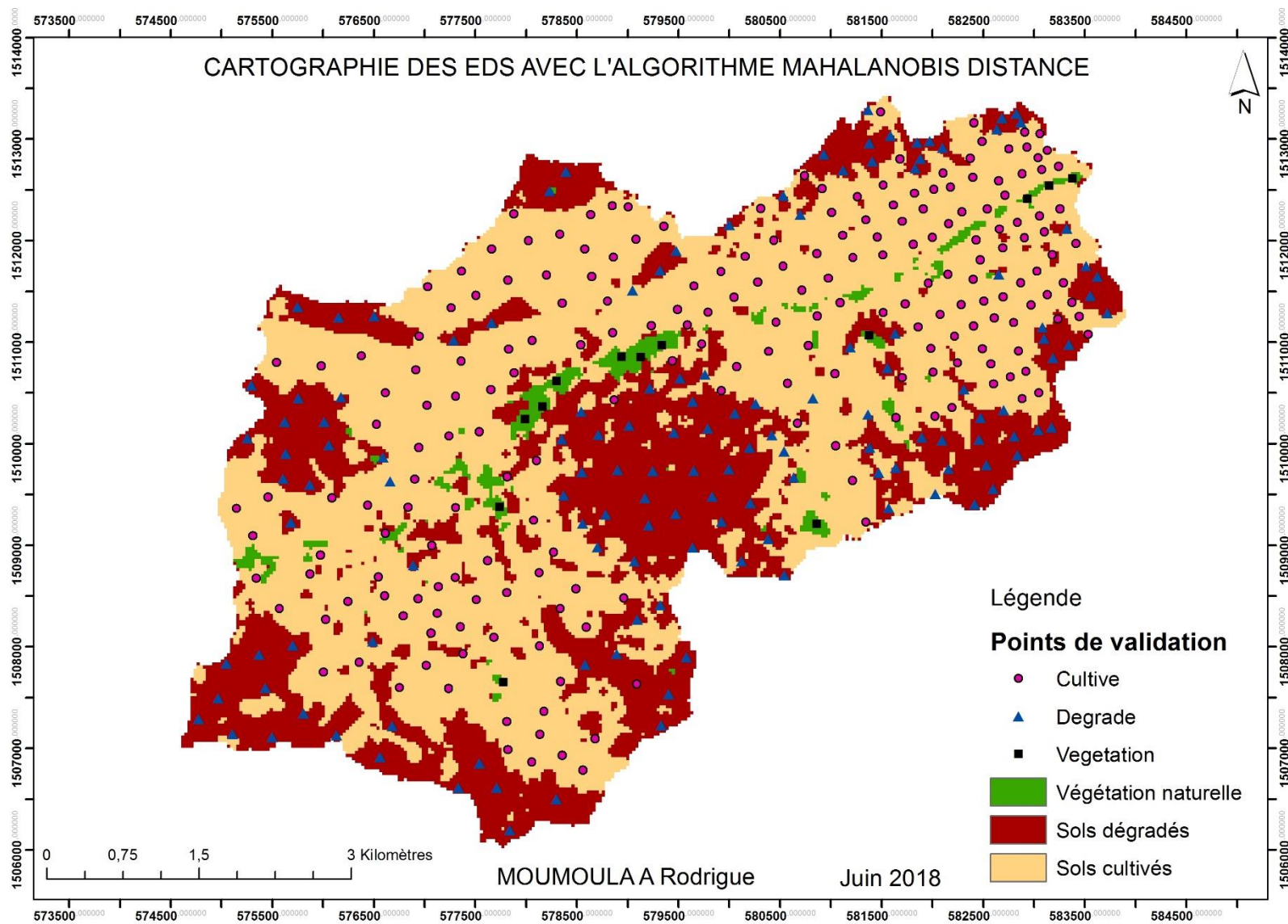


Figure 16 : Carte des états de surface à Tougou en 2017

III.2. L'analyse diachronique

En se basant sur la même démarche décrite précédemment, quatre cartes d'états de surface ont été établies aux dates de : 1986 ; 1999, 2009, 2017 (Figure 17).

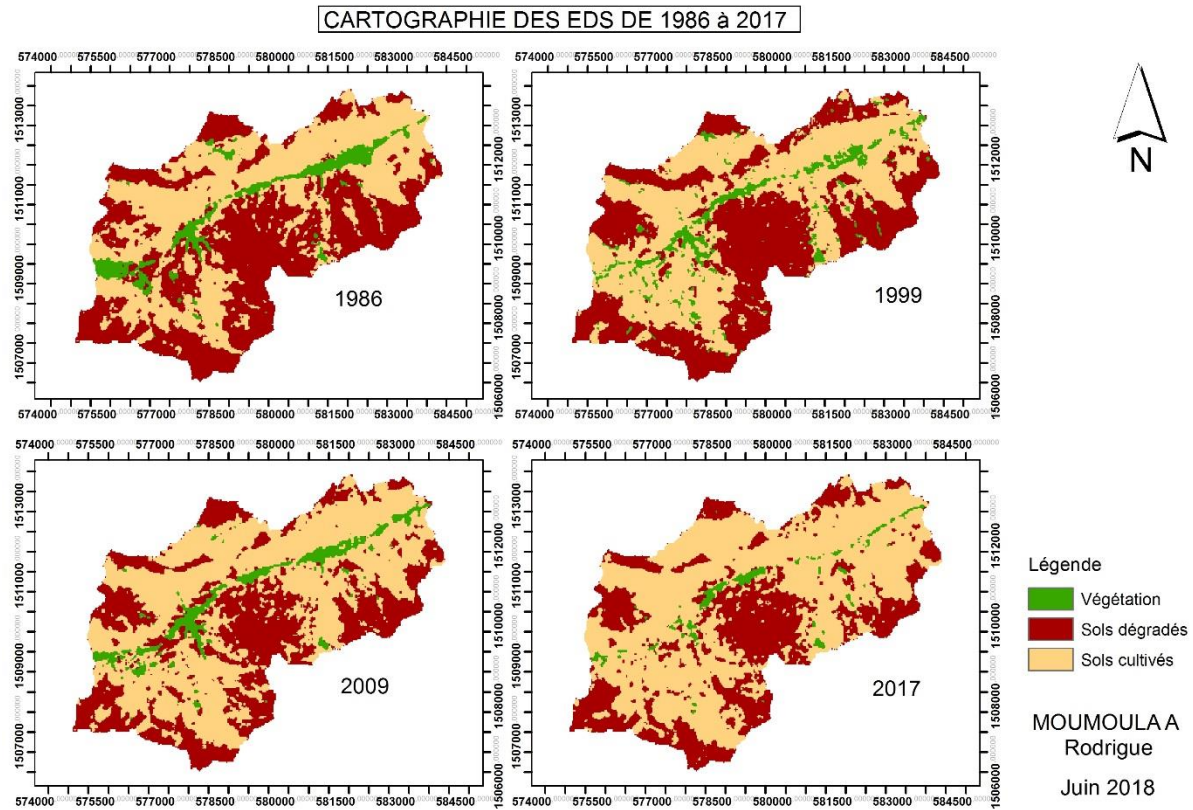


Figure 17 : Cartographie des états de surface

L'évolution des états de surface sur le bassin versant est résumées dans le Tableau 11 et Tableau 12. Le Tableau 11 montrent les taux d'occupation des états de surface sur le bassin aux différentes dates, tandis que le Tableau 12 montre les taux d'évolution annuels sur les différents intervalles d'étude.

	1986	1999	2009	2017
ZC	46%	48%	58%	64%
ZVN	7%	7%	6%	2%
ZD	47%	45%	37%	34%

Tableau 11 : Taux d'évolution des états de surface de 1986 à 2017

	ZC	ZVN	ZD
1986-1999	0,2%	0,0%	-0,2%
1999-2009	0,9%	-0,1%	-0,8%
2009-2017	0,8%	-0,4%	-0,3%
1986-2017	0,6%	-0,1%	-0,4%

Tableau 12 : Pourcentage de gains et de pertes entre 1986 et 2017

L'étude des transitions a permis de produire des séries de données permettant une analyse profonde de la dynamique du milieu sur les différents intervalles de temps. Il s'agit :

- ❖ Des changements nets observés (Figure 18) :

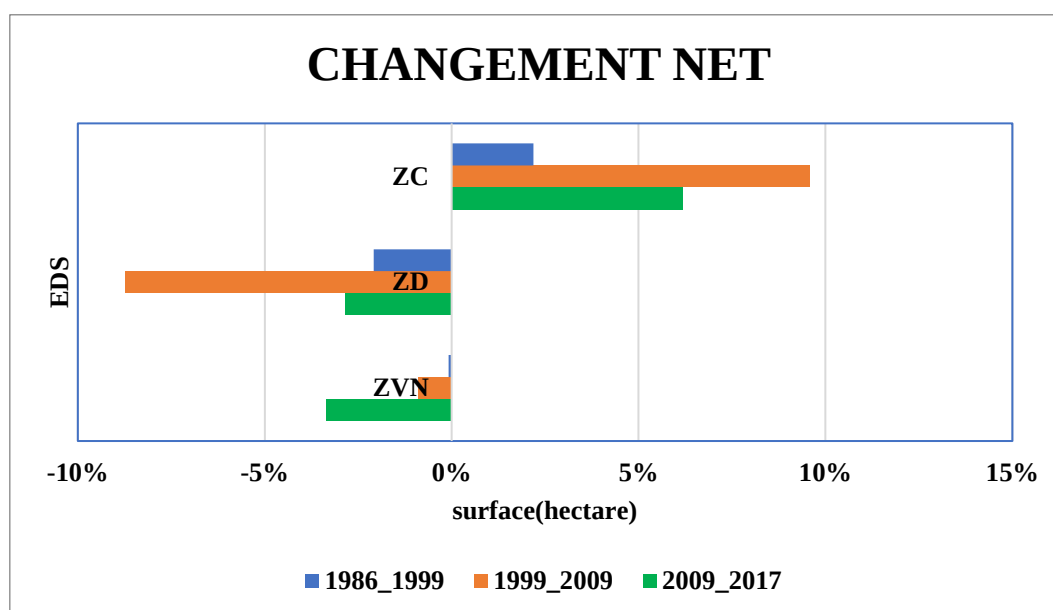


Figure 18 : Changement net des états de surface

- ❖ Des données relatives aux gains et aux pertes de chaque EDS (Figure 19, Figure 20, Figure 21)

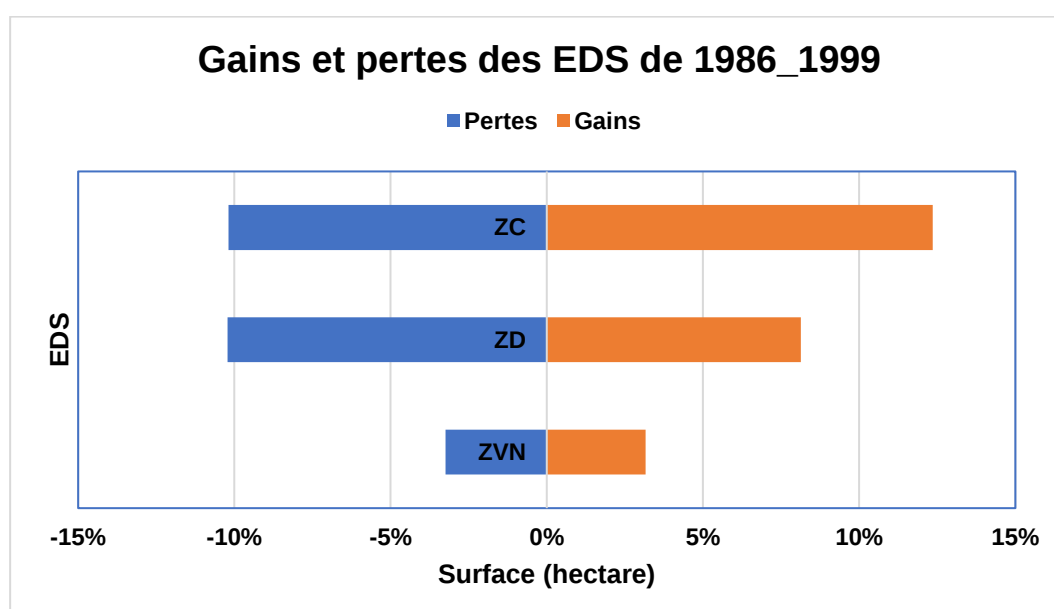


Figure 19 : Gains et pertes des états de surface entre 1986 et 1999

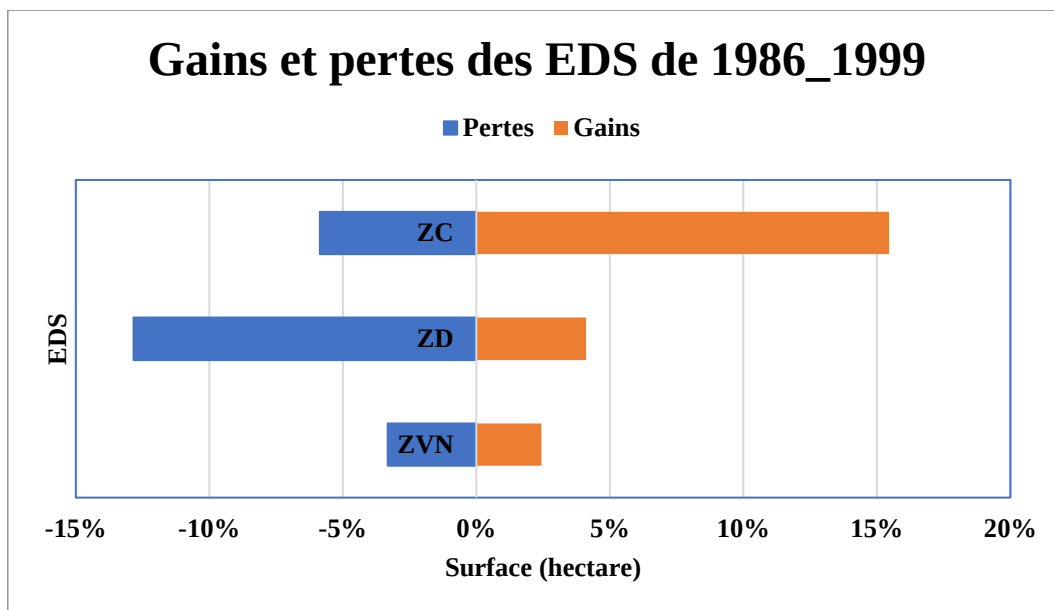


Figure 20 : Gains et pertes des états de surface entre 1999 et 2009

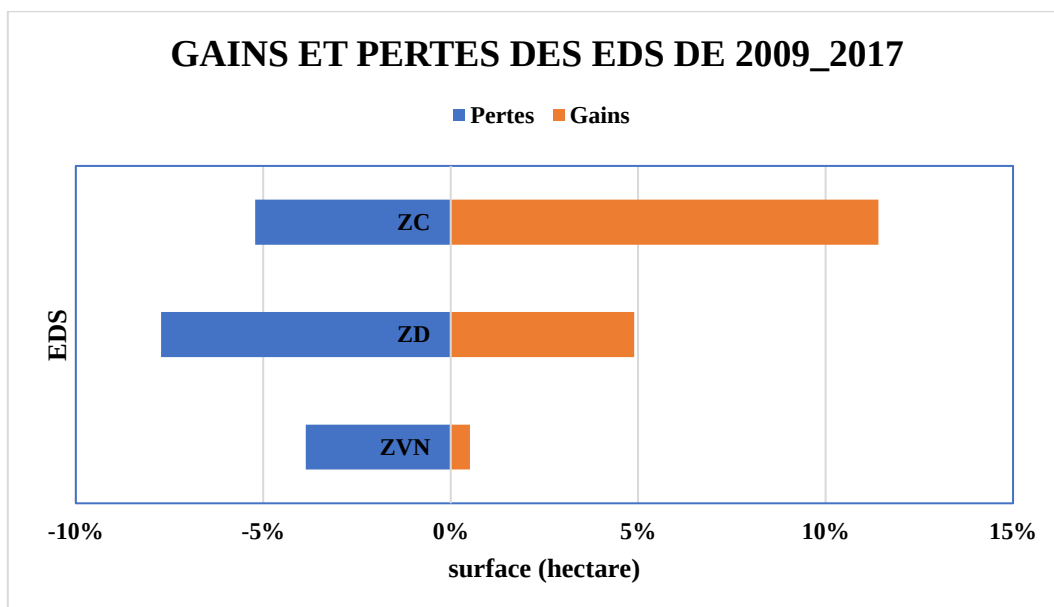


Figure 21 : Gains et pertes des états de surface entre 2009 et 2017

❖ Les contributions de chaque état de surface (Figure 22, Figure 23 et Figure 24)
 Les graphes ci-dessous expriment les contributions relatives des états de surface :

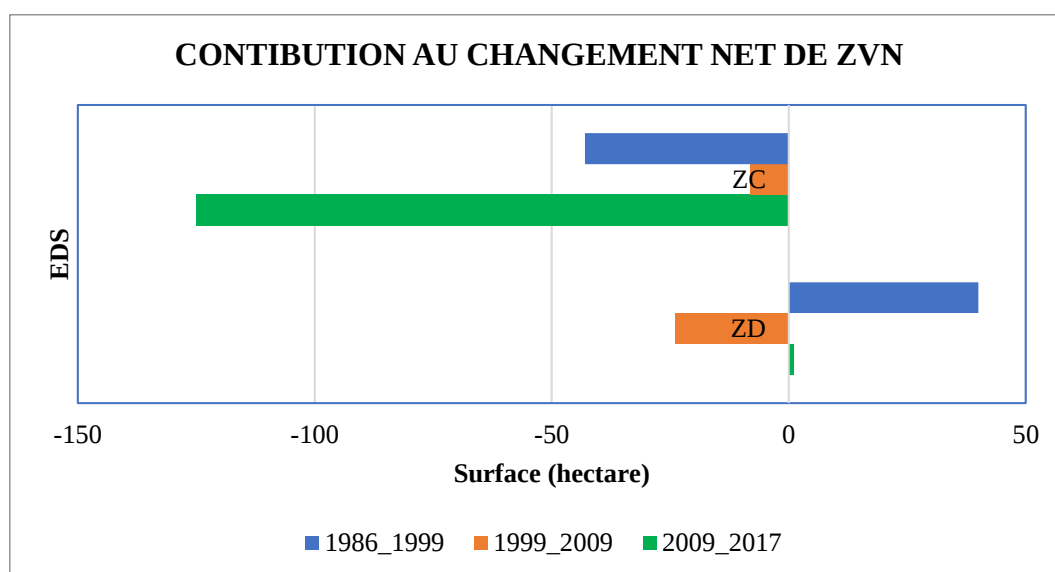


Figure 22 : Contribution de ZD et ZC à la dynamique de ZVN

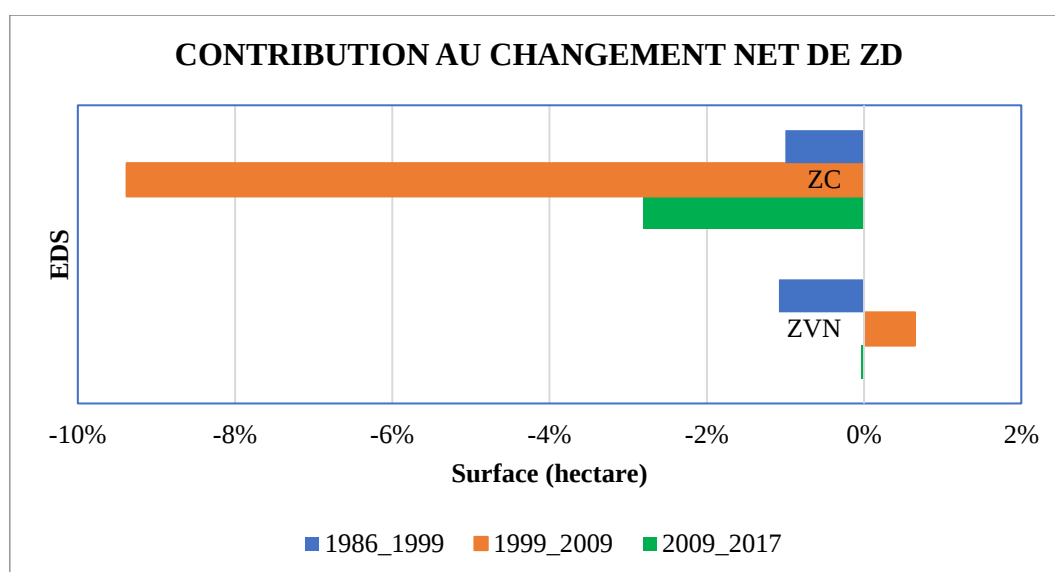


Figure 23 : Contribution de ZC et ZVN à la dynamique de ZD

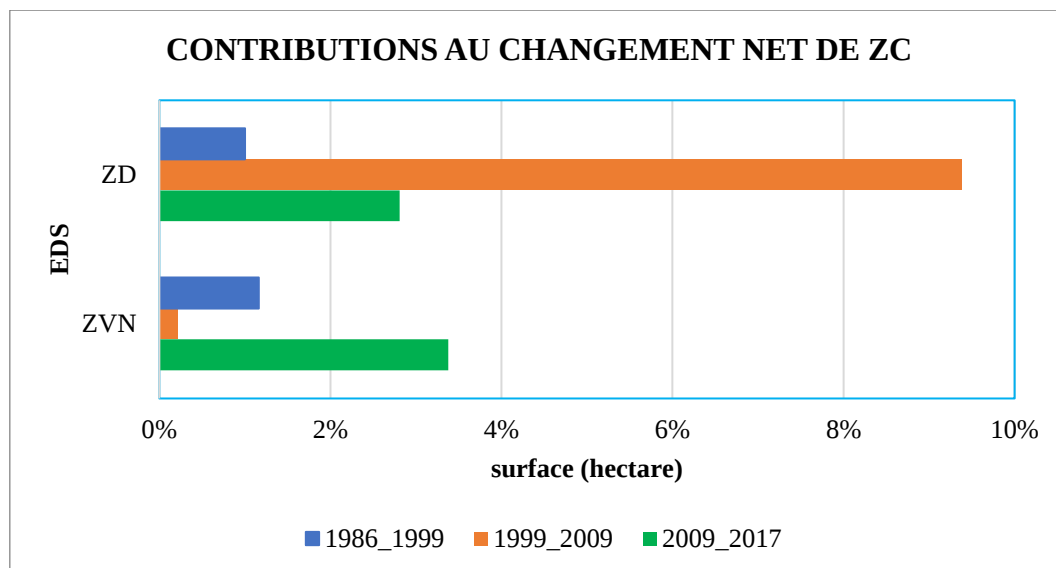


Figure 24 : Contribution de ZVN et de ZD à la dynamique de ZC

IV. DISCUSSION ET ANALYSES

La différenciation de plusieurs éléments en télédétection suppose une signature spectrale distincte. La qualité de la cartographie y dépend. Durant la période sèche la végétation présente un comportement différent des sols nus et cultivés qui sont à l'échelle du bassin versant indissociable. En effet il n'existe pas de signaux particuliers permettant de les dissocier. L'évènement contraire est vécu durant la saison des pluies où la zone dégradée s'isole du lot laissant apparaître une confusion entre les zones cultivées et la végétation. Les feuilles vertes des plantes et des cultures connaissant l'activité chlorophyllienne possèdent la même signature spectrale. Par contre le mois de novembre coïncide généralement avec la période des récoltes. Les tiges et les feuilles à cette période présentent un aspect sec. Cet état de fait permet de dissocier les différents éléments d'intérêts. Le test de séparabilité effectué sur l'image Landsat8 de la période optimale permet de confirmer le bon choix de la période. C'est une date qui a aussi été proposé par (Forkuor et al., 2015) pour une meilleure identification des zones cultivées.

La cartographie des états de surface dans le contexte sahélien fait face à l'hétérogénéité du milieu (Puech, 1993). Il faut donc avoir recours à un algorithme qui puisse les identifier avec la marge d'erreur la plus faible. Les algorithmes *mahalanobis* et *support vector machine* ont produit les meilleurs score de kappa et de F1 score. Les résultats cumulés, des scores kappa et des F1 score font de la *distance mahalanobis* le meilleur algorithme de classification pour ce cas d'étude. La particularité de cette méthode, c'est qu'elle accorde moins d'importance aux composantes les plus dispersées. Cela revient à minimiser l'influence des composantes les plus bruitées (Mahalanobis, 1936).

La dynamique observée à travers la cartographie évolutive des états de surface montre de manière globale une augmentation des zones cultivées au profit des zones dégradées et la végétation naturelle. Elle s'explique en grande partie par l'augmentation de la population. En passant de 4322 en 1975 à 7089 en 2004, le bassin a connu une augmentation de 64%. Cependant l'augmentation des surfaces cultivées estimées à 18 % reste modeste par rapport l'évolution de la population. Cet état de fait pourrait trouver son explication dans la mise en valeur de surfaces existant hors du bassin par des populations pourtant prise en compte dans le décompte. Il est donc difficile d'évaluer précisément l'impact de l'augmentation de la population.

L'une des choses les plus frappantes dans l'étude de la dynamique est l'association des résultats publiés par Marchal entre 1952 et 1973 et celle que nous avons obtenu. Les taux obtenus par

Marchal (1983) montrent déjà une forte utilisation du bassin versant depuis les années 1952. Le taux des zones cultivées étant de 59% en 1973 passera à 46% en 1986. Ce qui semble contredire la dynamique proposée par Diello (2007). Cette cassure abordée différemment serait due selon Sawadogo et al. (2008) à la qualité des images utilisées par Marchal (1983). Toutes fois ces différentes études d'observations faites sur la base de photographies aériennes ont été appuyées par de profondes investigations de terrain qui lèvent le doute sur la pertinence des résultats produits. Une situation qui peut être rapprochée aux différents flux migratoires qu'a connu la zone autour des années 1970. En effet la zone du nord a connu de longues vagues de migrations de bras valides vers des destinations plus favorables telle que la Côte d'Ivoire. (Benoit, 1982; Marchal, 1983). L'observation des données démographiques du bassin versant de Tougou montre une diminution de la population au début des années 1970.

L'analyse des taux d'évolution à elle seule ne permettent pas de mieux cerner les trois principes fondamentaux de l'évolution du milieu : la régression, la progression et la substitution. Les graphes de changement net, de contributions de chaque état de surface à l'évolution des autres, les gains et les pertes permettent de mieux expliquer les différents échanges effectués sur le bassin versant. Les zones dégradées ont le plus contribué à l'augmentation des surfaces cultivées. Ces derniers ont fait l'objet d'un travail de récupération qui se poursuit de nos jours. Bien aménagés avec les cordons pierreux et les zaï, les zipella produisent très bien, surtout ceux qui ont des textures plus limoneuses (Sawadogo et al., 2008).

Cette part importante des zones dégradées ne cache pas la contribution des zones à végétation naturelle dont la surface n'est plus conséquente. Les cartes de persistance ont révélé des zones fortement exploitées à des fins agropastorales depuis les années 1952. La superposition de ces zones de persistance avec la géomorphologie du bassin montre que les bas-fonds sont fortement utilisés au détriment des sommets de collines qui sont restés dégradés. En effet les zones de bas-fond favorisées par leur humidité et l'apport des nutriments sont les plus convoitées.

CONCLUSION

La cartographie des états de surface a été le centre d'intérêt de plusieurs auteurs dans le contexte sahélien. A l'échelle du bassin versant la télédétection est l'outil le mieux adapté pour appréhender la dynamique du milieu si l'on trouve le meilleur procédé pour l'identification des différents états de surface. Cela suppose la mise en place d'une méthodologie efficace pour la cartographie des sites d'intérêts.

La première étape de la démarche consistait à identifier la période et l'algorithme idéal pour la cartographie. Ainsi à travers une analyse de la dynamique saisonnière menée sur la base des indices radiométriques, le mois de novembre a été choisi comme la période idéale. L'identification de l'algorithme *distance de Mahalanobis* comme moteur de classification optimal a été possible grâce à la validation effectuée sur la base de 357 points de validations.

L'analyse diachronique conduite sur la période de 1986 à 2017 a permis d'appréhender la dynamique du milieu. Cette dynamique observée à travers la cartographie évolutive, montre une augmentation de manière globale des zones cultivées de 18 % depuis les années 1986. Les zones dégradées ont connu également une évolution, quoique moins marquée, pour une double raison : le besoin croissant en espace pour la culture, qui a obligé les populations à se tourner vers les terres incultes une fois les zones en végétation naturelle exploitées à saturation ; et les processus de récupération à travers divers programmes ayant intervenus dans la zone d'étude sur la période 1980 à 2000, et qui à nos jours continuent leurs activités de promotion des techniques de conservation des eaux et des sols.

V. LIMITES, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

- ❖ La discussion de l'évolution a buté sur l'absence de données démographiques à des dates rapprochées qui ne permet pas de mesurer l'impact précis de l'augmentation de la population sur l'évolution des états de surface. En plus plusieurs zones d'exploitations agricoles se retrouve hors du bassin.
- ❖ La modélisation de l'évolution des états de surface serait une option importante pour mieux prévoir sa dynamique.
- ❖ La mesure des caractéristiques hydrodynamiques de ces états de surface permettrait d'en faire une connexion avec l'hydrologie.
- ❖ Ces zones ne présentent pas des comportements différents face à l'érosion. De même il serait intéressant de déterminer l'érodibilité.
- ❖ Le suivi annuel de variabilité du milieu pourrait permettre de cerner la variabilité du milieu

Bibliographie

- Albergel, J. (1986). Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne: exemple du Burkina-Faso.
- Albergel, J. (1987). Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface: application aux petits bassins du Burkina Faso. *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* 168, 355–365.
- Amogu, O., Esteves, M., Vandervaere, J., Malam Abdou, M., Panthou, G., Rajot, J.-L., Souley Yéro, K., Boubkraoui, S., Lapetite, J.-M., Dessay, N., et al. (2015). Runoff evolution due to land-use change in a small Sahelian catchment. *Hydrological Sciences Journal* 60, 78–95.
- Armand, R. (2009). Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement. PhD Thesis. Université de Strasbourg.
- Arora, M., Foody, G. (1997). Log-linear modelling for the evaluation of the variables affecting the accuracy of probabilistic, fuzzy and neural network classifications. *International Journal of Remote Sensing* 18, 785–798.
- Benoit, M. (1982). Nature peul du Yatenga: remarques sur le pastoralisme en pays mossi.
- Boiffin, J., Monnier, G. (1986). Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting. Proceedings. 1986; Symposium, Ghent, BEL, 1985-, 210-217, p.
- Botoni, E., Reij, C. (2009). La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel: Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles. *Ouagadougou, Burkina Faso et Amsterdam, The Netherlands: Comité Permanent Inter Etats Pour La Lutte Contre La Sécheresse Au Sahel and Vrije Universiteit Amsterdam*.
- BUNASOLS (2004). Etudes morpho-pédologique des provinces du Yatenga, du Loroum et du Zondoma (Région du NORD: Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des ressources halieutiques).
- Carbonnel, J., Hubert, P. (1992). Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne: remise en cause de la stationnarité des séries.
- Casenave, A., Valentin, C. (1989). Les états de surface de la zone sahéenne: influence sur l'infiltration.
- Dalmedico, A.D., Guillemot, H. (2006). Changement climatique: dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. *Sociologie Du Travail* 48, 412–432.
- Descroix, L., Diedhiou, A. (2012a). Etat des sols et évolution dans un contexte de changements climatiques.
- Descroix, L., Diedhiou, A. (2012b). Etat des sols et évolution dans un contexte de changements climatiques.
- Diello, P. (2007). Interrelation climat-homme-environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique.
- Foody, G.M., Mathur, A. (2004). Toward intelligent training of supervised image classifications: directing training data acquisition for SVM classification. *Remote Sensing of Environment* 93, 107–117.
- Foody, G., McCulloch, M., Yates, W. (1995). The effect of training set size and composition on artificial neural network classification. *International Journal of Remote Sensing* 16, 1707–1723.

-
- Forkuor, G., Conrad, C., Thiel, M., Landmann, T., Barry, B. (2015). Evaluating the sequential masking classification approach for improving crop discrimination in the Sudanian Savanna of West Africa. *Computers and Electronics in Agriculture* 118, 380–389.
- Ganaba, S. (1999). Les ligneux à usage de bois d'énergie en région sahélienne du Burkina Faso: préférence des groupes ethniques (Sécheresse).
- Ghran-Messedi, A., Delaître, É. (2007). Les états de surface en zone aride à partir d'indices radiométriques et de classifications multitemporelles d'images Landsat TM prises sur la région de Menzel Habib (Tunisie méridionale). *Science et Changements Planétaires/Sécheresse* 18, 305–313.
- Hepner, G., Logan, T., Ritter, N., Bryant, N. (1990). Artificial neural network classification using a minimal training set- Comparison to conventional supervised classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56, 469–473.
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D. (2001). African climate change: 1900–2100. *Climate Research* 17, 145–168.
- INSD (2008). Recensement général de la population et de l'habitation 2004 (RGPH 2004) - Rapport d'analyse du thème 2 : Etat et structure de la population. Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) (Burkina Faso: Ministère de l'Economie et des Finances. Ouagadougou, Burkina Faso).
- IWACO (1990). Etude du bilan d'eau au Burkina Faso: Etudes de quatre bassins versants expérimentaux au Burkina Faso. Volume II, bassin de Tougou.
- IWACO (1993). Etude du bilan d'eau au Burkina Faso: Aperçu des mesures hydrologiques de quatre bassins versants expérimentaux au Burkina Faso.
- Karambiri, H., Ribolzi, O., Delhoume, J.-P., Ducloux, J., Coudrain-Ribstein, A., Casenave, A. (2003). Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. *Hydrological Processes* 17, 1495–1507.
- Koussoube, A. (2006). Dynamique du couvert végétal et de la production agricole du bassin versant de Tougou (Au nord du Burkina Faso) (2iE).
- Lamachère, J. (1994). Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahélienne et soudanienne (Burkina Faso): effets sur le ruissellement et sa modélisation. *Comm. IXes Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier*.
- Lambin, E. (1988). L'apport de la télédétection dans l'étude des systèmes agraires d'Afrique: l'exemple du Burkina Faso. *Africa* 58, 337–352.
- Le Barbé, L., Lebel, T., Tapsoba, D. (2002). Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *Journal of Climate* 15, 187–202.
- L'hôte, Y., Mahé, G., Somé, B., Triboulet, J.P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal* 47, 563–572.
- Louvet, S., Barbier, B., Ruelland, D., Diancumba, M., Traore, P., Paturel, J., Mahé, G. (2012). Évolution de l'occupation du sol sous pression anthropique et impact sur le ruissellement de surface et les coefficients d'écoulement dans le bassin versant du Bani.
- Luxereau, A., Roussel, B. (1997). Changements écologiques et sociaux au Niger: Des interactions étroites.
- Mahalanobis, P.C. (1936). On the generalized distance in statistics. (National Institute of Science of India), p.
- Mahé, G. (1993). Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique: étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes.
- Mahé, G., Paturel, J.-E. (2009). 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience* 341, 538–546.
-

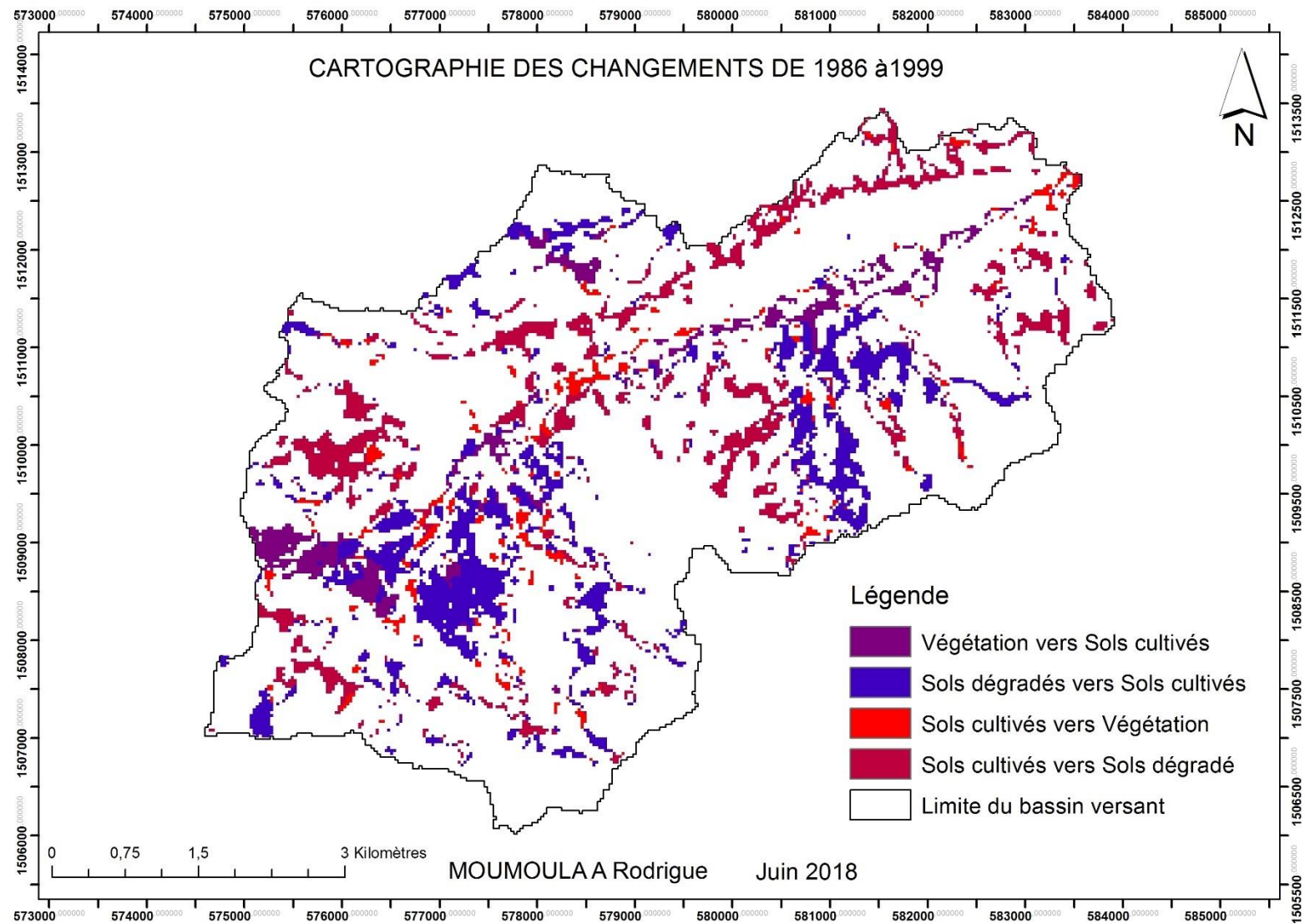
-
- Mahé, G., Olivry, J.C., Servat, E. (2005). Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux: extrêmes et paradoxes. *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change—Hydroclimatic Variability*, Edited by S. Frank, T. Wagener, E. Bøgh, H.V. Gupta, L. Bastidas, C. Nobre and C. de Oliveira Galvão 169–177.
- Maiga-Yaleu, S. (2014). Etude géochimique de l'eau de ruissellement du bassin versant de Tougou. PhD Thesis. 2iE.
- Mara, F. (2010). Développement et analyse des critères de vulnérabilité des populations sahéniennes face à la variabilité du climat: le cas de la ressource en eau dans la vallée de la Sirba au Burkina Faso. PhD Thesis. Université du Québec à Montréal.
- Marchal, M. (1983). Les paysages agraires de Haute-Volta: analyse structurale par la méthode graphique (IRD Editions).
- McCaffrey, T.M., Franklin, S.E. (1993). Automated training site selection for large-area remote-sensing image analysis. *Computers & Geosciences* 19, 1413–1428.
- McNairn, H., Protz, R. (1993). Mapping corn residue cover on agricultural fields in Oxford County, Ontario, using Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing* 19, 152–159.
- Mounirou, L.A. (2012). Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahénienne du Burkina Faso: quantification et transposition des données. PhD Thesis. Montpellier 2.
- Niang, D. (2006). Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le Sahel burkinabè.
- Nonguierma, A., Dautrebande, S. (2006). Modélisation hydrologique de petits bassins versants ruraux sahéniens. apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour la détermination des paramètres. *Télédétection et Ressources En Eau*.
- Ouédraogo, E., Mando, A., Zombré, N. (2001). Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 84, 259–266.
- Ozer, P. (2004). Bois de feu et déboisement au Sahel: mise au point. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse* 15, 243–251.
- Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T. (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology* 34, 3998–4006.
- Paturel, J., Servat, E., Delattre, M., Lubès-Niel, H. (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahénienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal* 43, 937–946.
- Pontius, R.G., Shusas, E., McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 101, 251–268.
- Pouyaud, B. (1987). Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques. *The Influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* 447–461.
- Puech, C. (1993). Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants: application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. PhD Thesis. Grenoble 1.
- Richards, J.A. (1999). Remote sensing digital image analysis (Springer).
- Rouse Jr, J.W., Haas, R.H., Schell, J., Deering, D. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.

-
- Sawadogo, H., Zombre, N.P., Bock, L., Lacroix, D. (2008a). Evolution de l'occupation du sol de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso) à partir de photographies aériennes. *Télédétection* 8, 59–73.
- Sawadogo, H., Zombre, N.P., Bock, L., Lacroix, D. (2008b). Evolution de l'occupation du sol de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso) à partir de photographies aériennes. *Télédétection* 8, 59–73.
- Somé, L., Sissoko, K., Zougmore, R.B., Traoré, B., Amadou, M., Moussa, A.S., Förch, W., Garlick, C., Ochieng, S., Kristjanson, P., et al. (2011). Résumé des résultats des enquêtes de base niveau ménage: site de Tougou, Burkina Faso.
- Thiombiano, L. (2000). Etude de l'importance des facteurs édaphiques et pédopaysagiques dans le développement de la désertification en zone sahélienne du Burkina Faso. *These d'État, Université de Cocody, République de Côte d'Ivoire*.
- Thiombiano, A., Kampmann, D. (2010). Atlas de la Biodiversité de L'Afrique de L'Ouest, Tome II: Burkina Faso (Goethe-Universität Frankfurt am Main, Geowissenschaften/Geographie).
- Valentin, C., Bresson, L.-M. (1992). Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55, 225–245.
- Vermote, E.F., Tanré, D., Deuze, J.L., Herman, M., Morcette, J.-J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, 675–686.

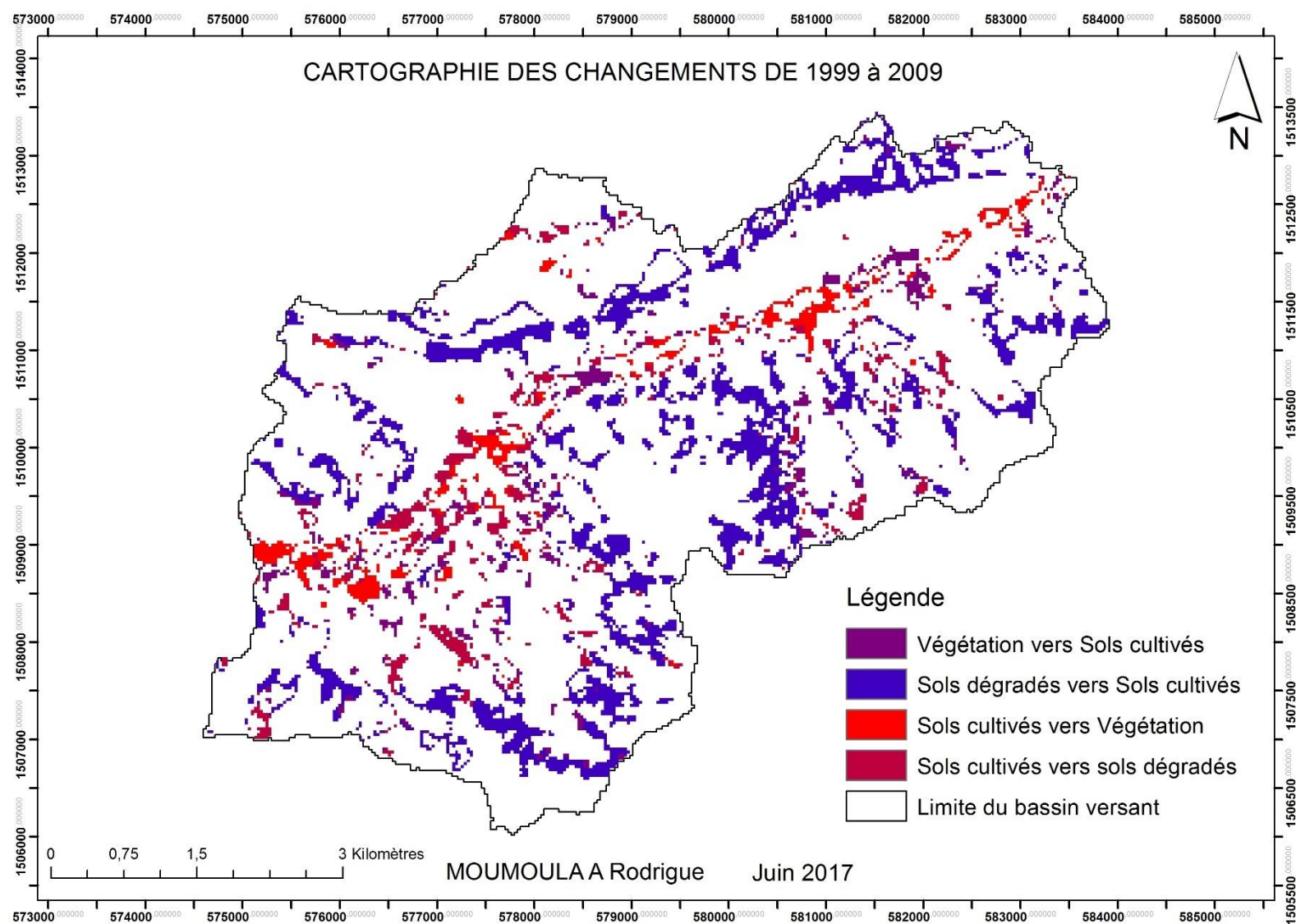
ANNEXES

Annexe 1 : Cartographie des changements de 1986 à 1999.....	45
Annexe 2 : Cartographie des changements de 1999 à 2009.....	46
Annexe 3 : Cartographie des changements de 2009 à 2017.....	47
Annexe 4 : Cartographie des zones de persistance de 1986 à 1999.....	48
Annexe 5 : Cartographie des zones de persistance de 1999 à 2009.....	49
Annexe 6 : Cartographie des zones de persistance de 2009 à 2017.....	50
Annexe 7 : Cartographie des pertes et des gains des zones cultivées de 1986 à 1999.....	51
Annexe 8 : Cartographie des pertes et des gains des zones cultivés de 1999 à 2009	52
Annexe 9 : Cartographie des pertes et des gains des zones cultivées de 2009 à 2017.....	53
Annexe 10 : Cartographie des pertes et des gains des zones dégradées de 1986 à 1999.....	54
Annexe 11 : Cartographie des pertes et des gains des zones dégradées de 1999 à 2009.....	55
Annexe 12 : Cartographie des pertes et des gains des zones à végétation naturelle de 1986 à 1999.....	56
Annexe 13 :Cartographie des pertes et des gains des zones à végétation naturelle de 1999 à 2009.....	57
Annexe 14 : Cartographie des pertes et des gains des zones à végétation naturelle de 2009 à 2017.....	58

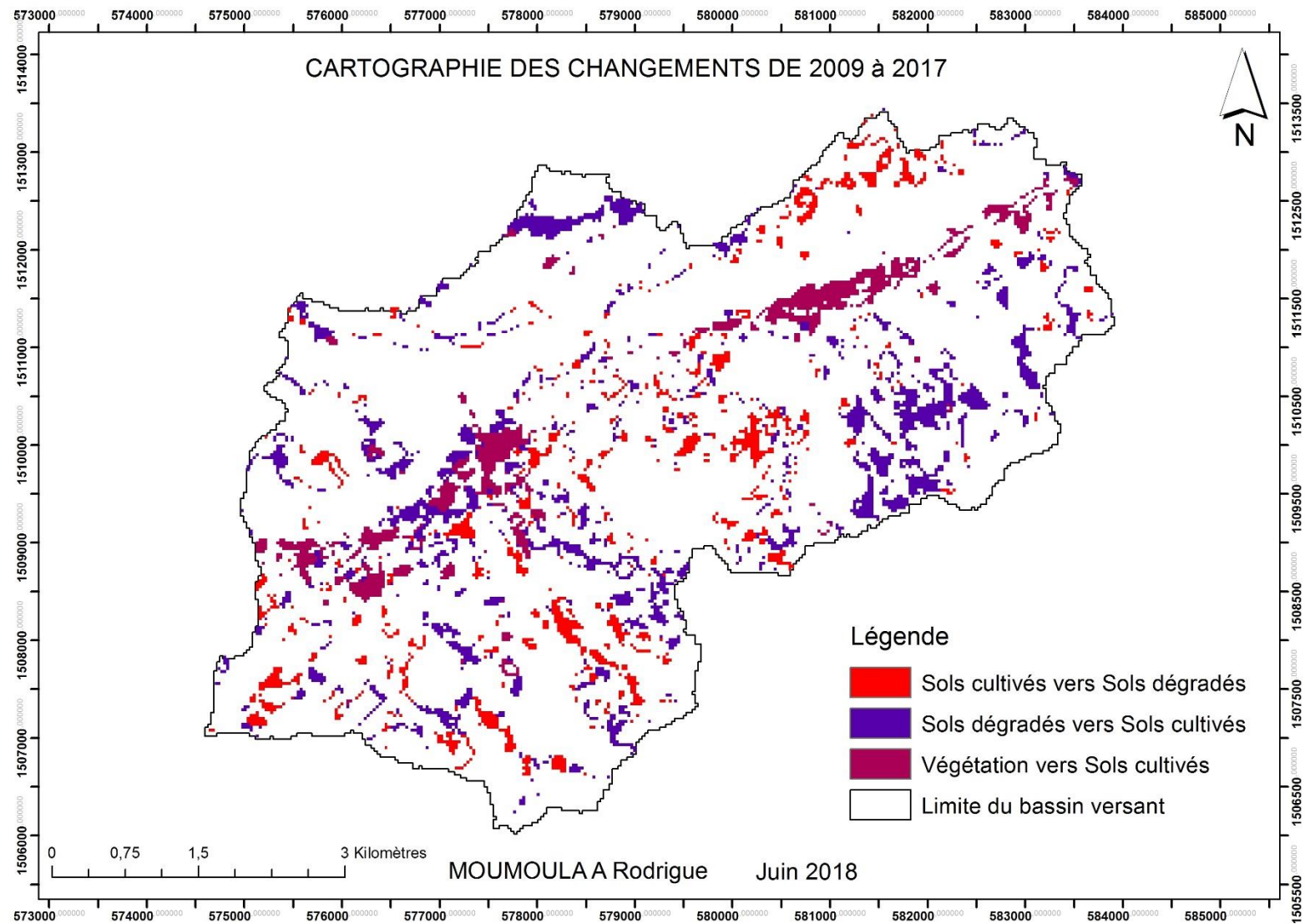
Annexe 1 : Cartographie des changements de 1986 à 1999



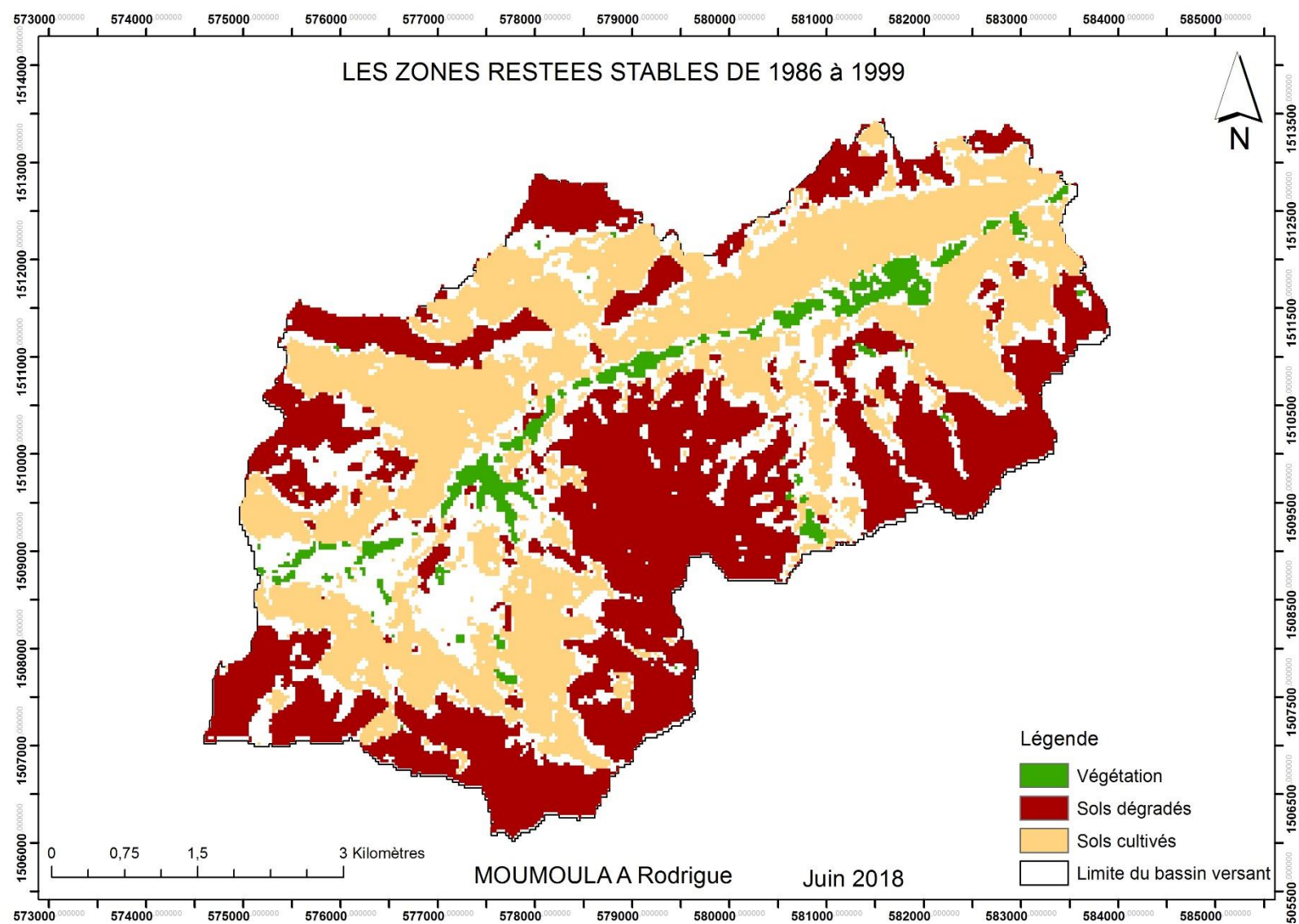
Annexe 2 : Cartographie des changements de 1999 à 2009



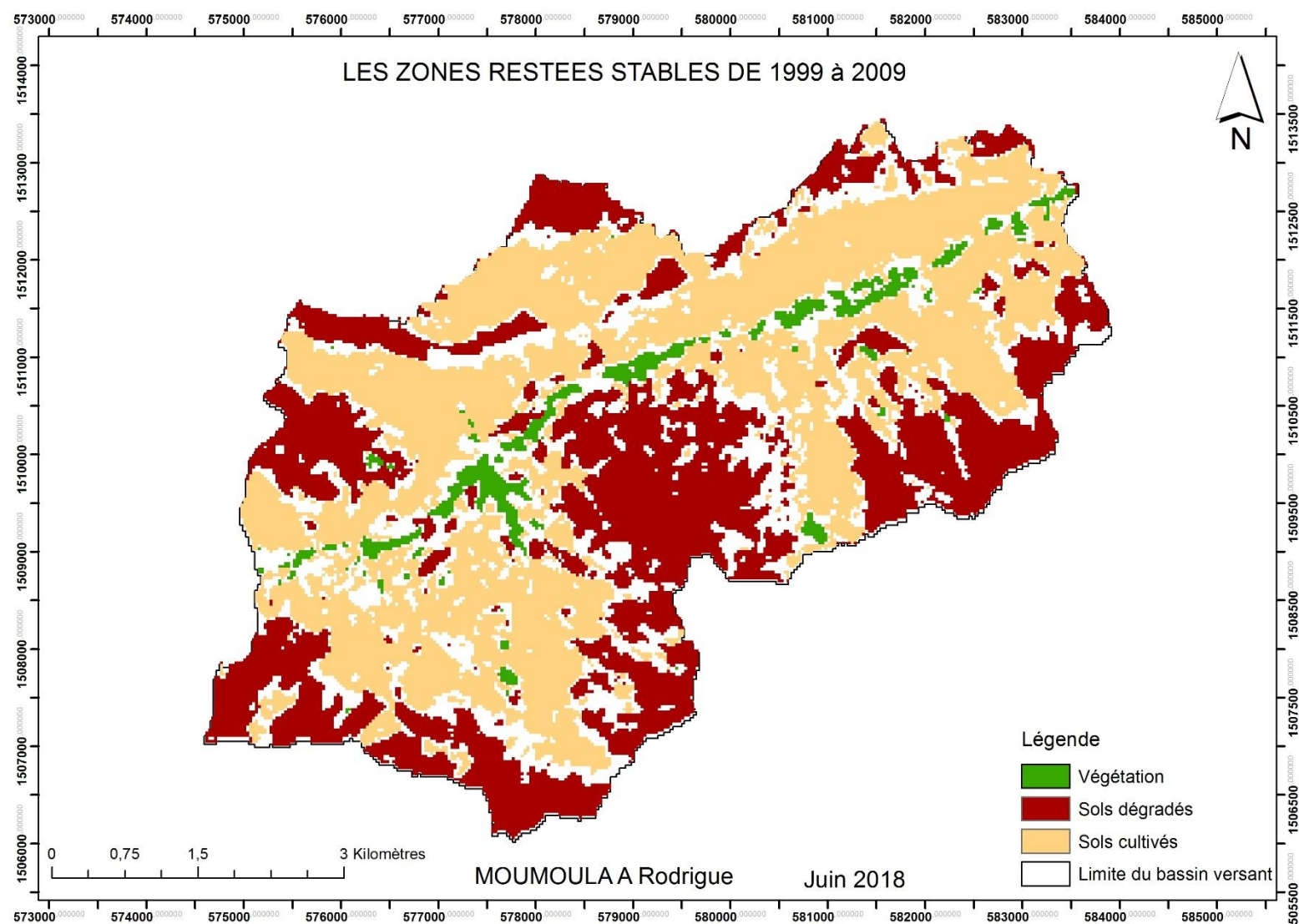
Annexe 3 : Cartographie des changements de 2009 à 2017



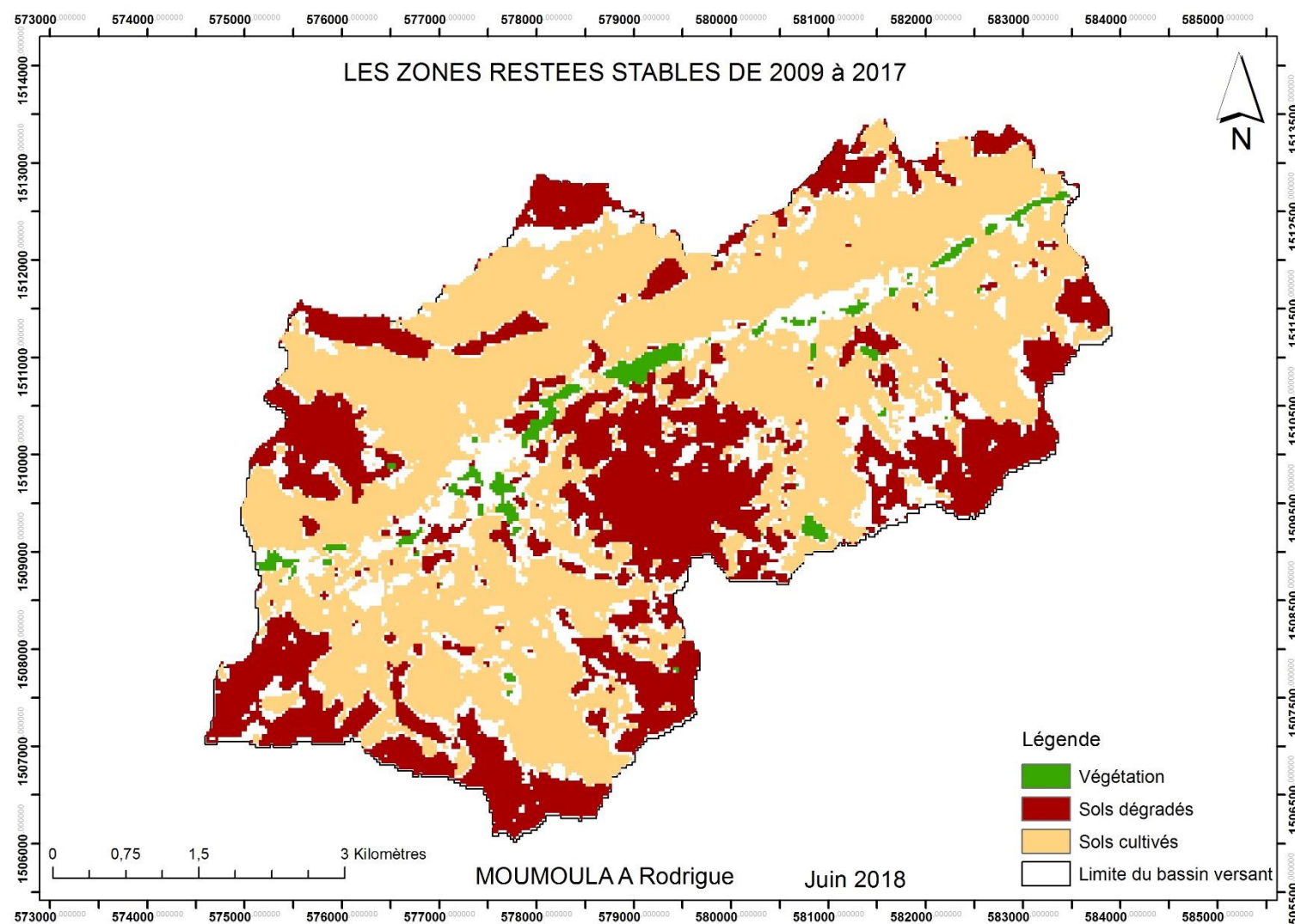
Annexe 4 : Cartographie des zones de persistance de 1986 à 1999



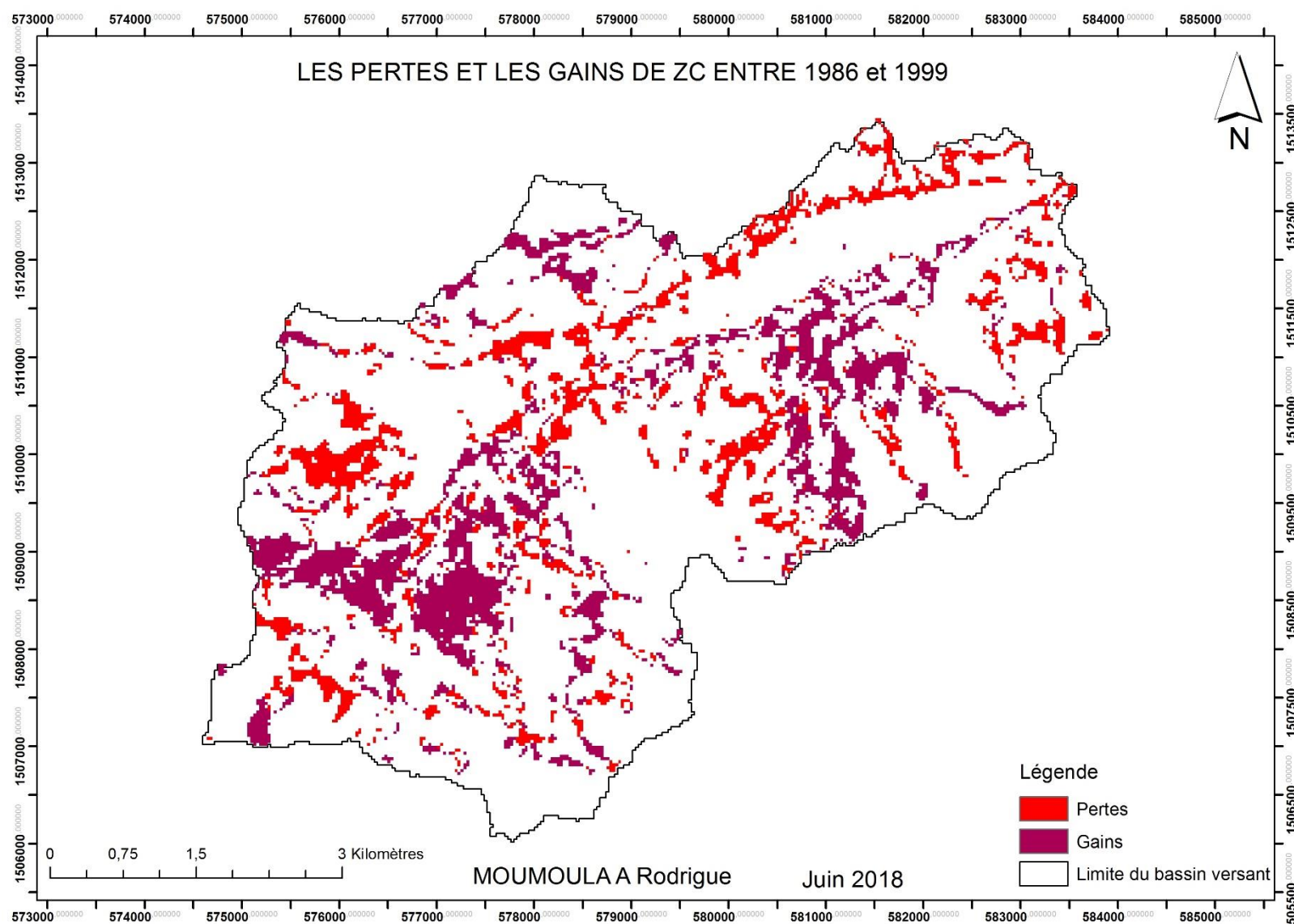
Annexe 5 : Cartographie des zones de persistance de 1999 à 2009



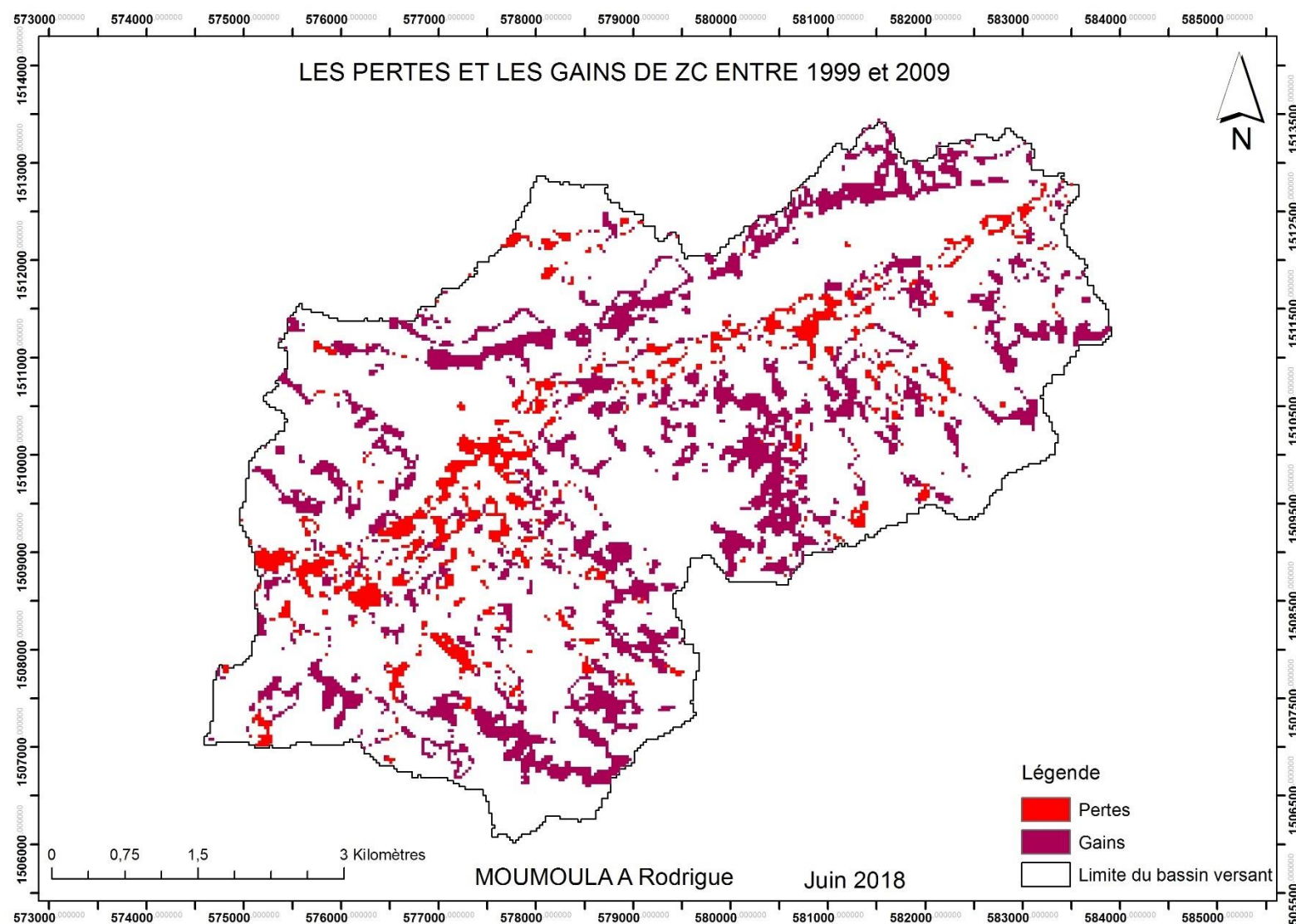
Annexe 6 : Cartographie des zones de persistance de 2009 à 2017



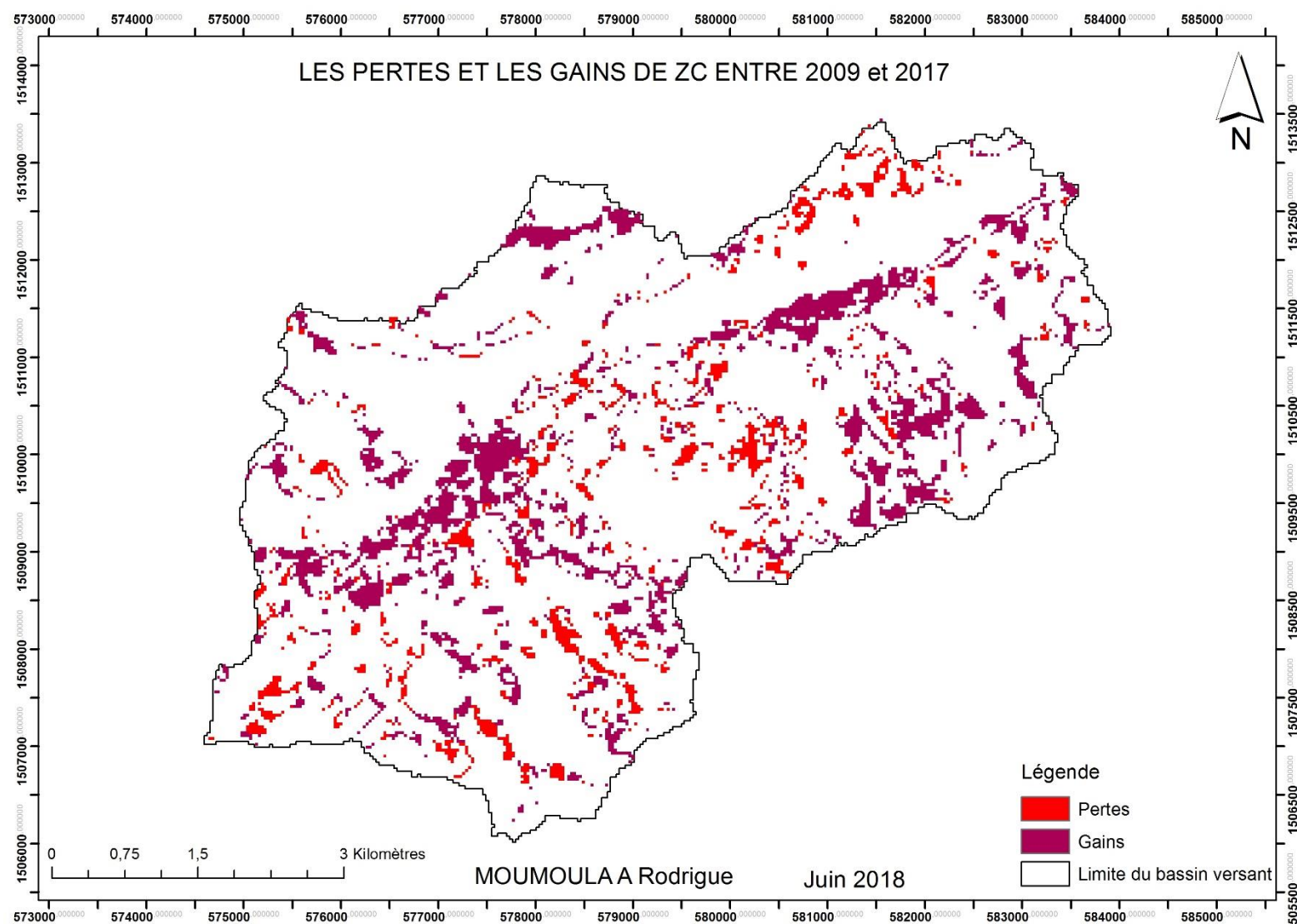
Annexe 7 : Cartographie des pertes et des gains des zones cultivées de 1986 à 1999



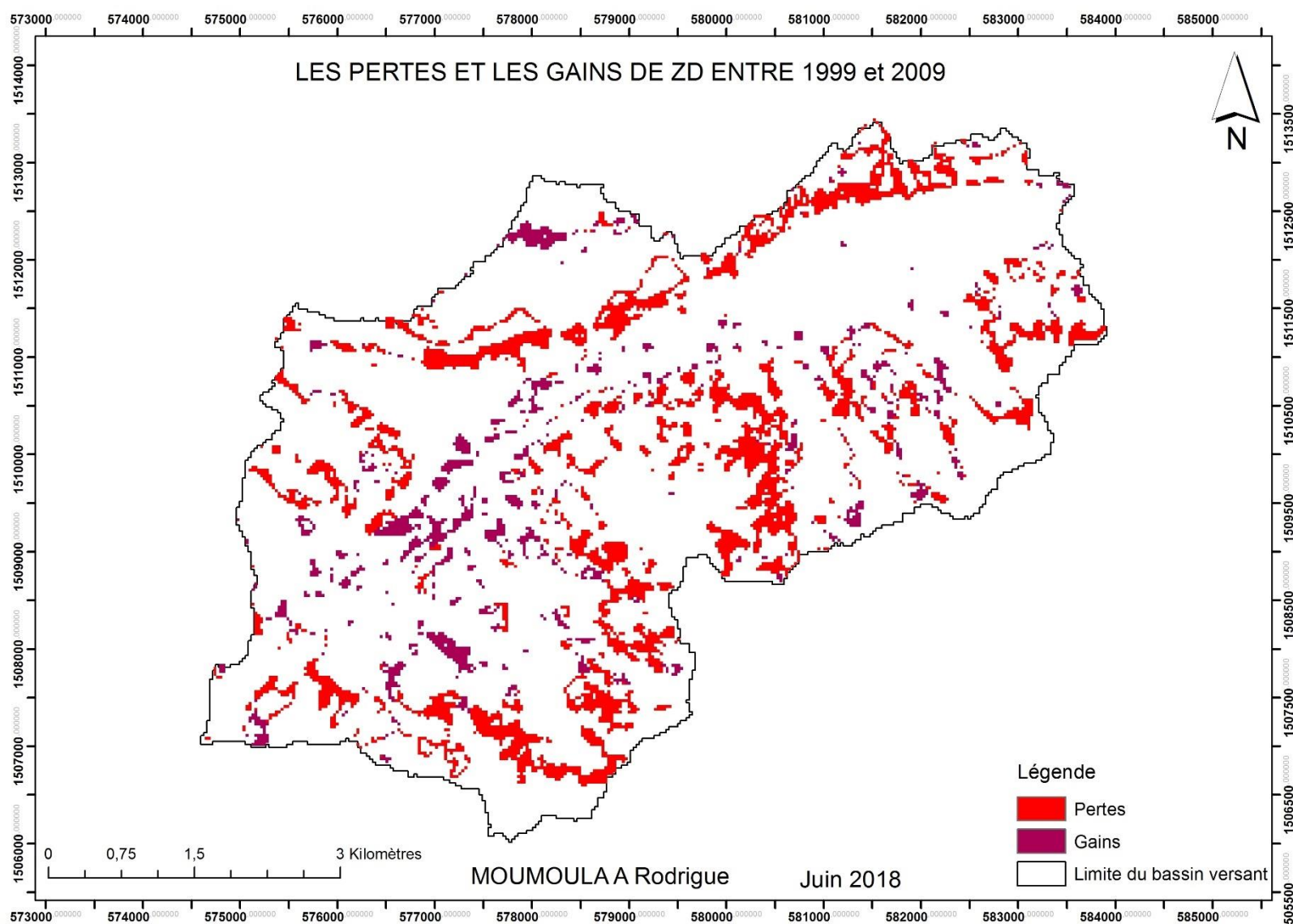
Annexe 8 : Cartographie des pertes et des gains des zones cultivées de 1999 à 2009



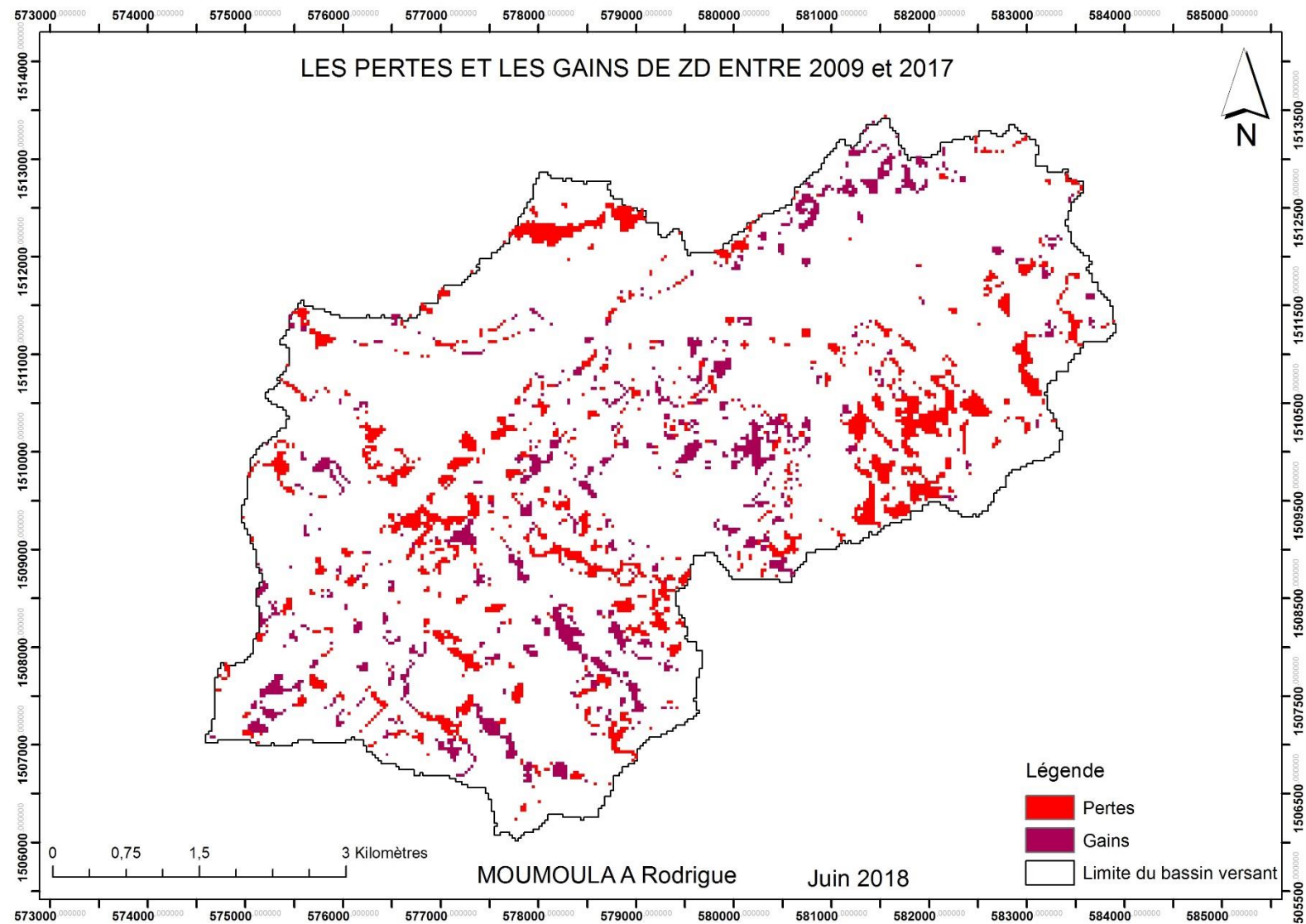
Annexe 9 : Cartographie des pertes et des gains des zones cultivées de 2009 à 2017



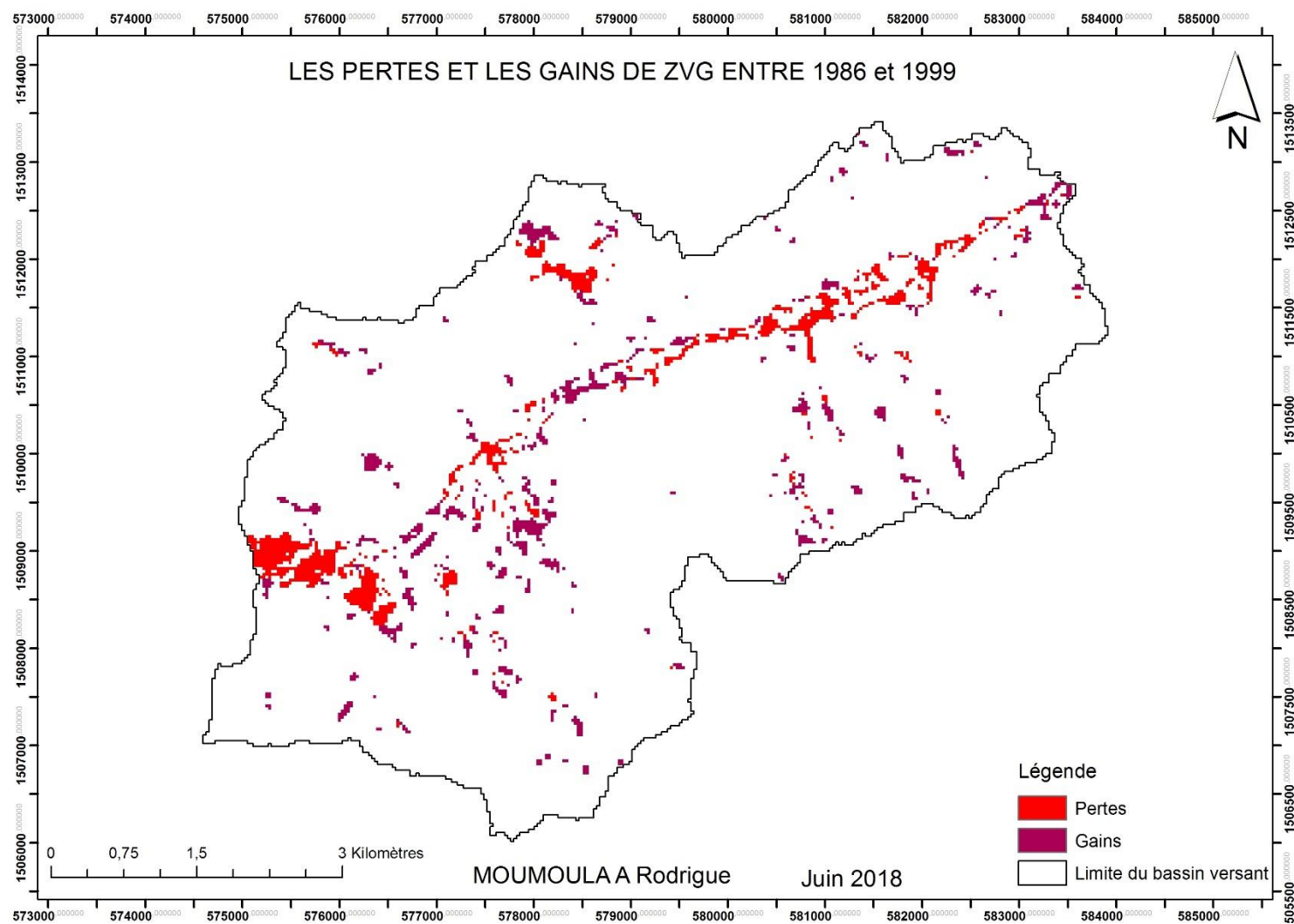
Annexe 10 : Cartographie des pertes et des gains des zones dégradées de 1999 à 2009



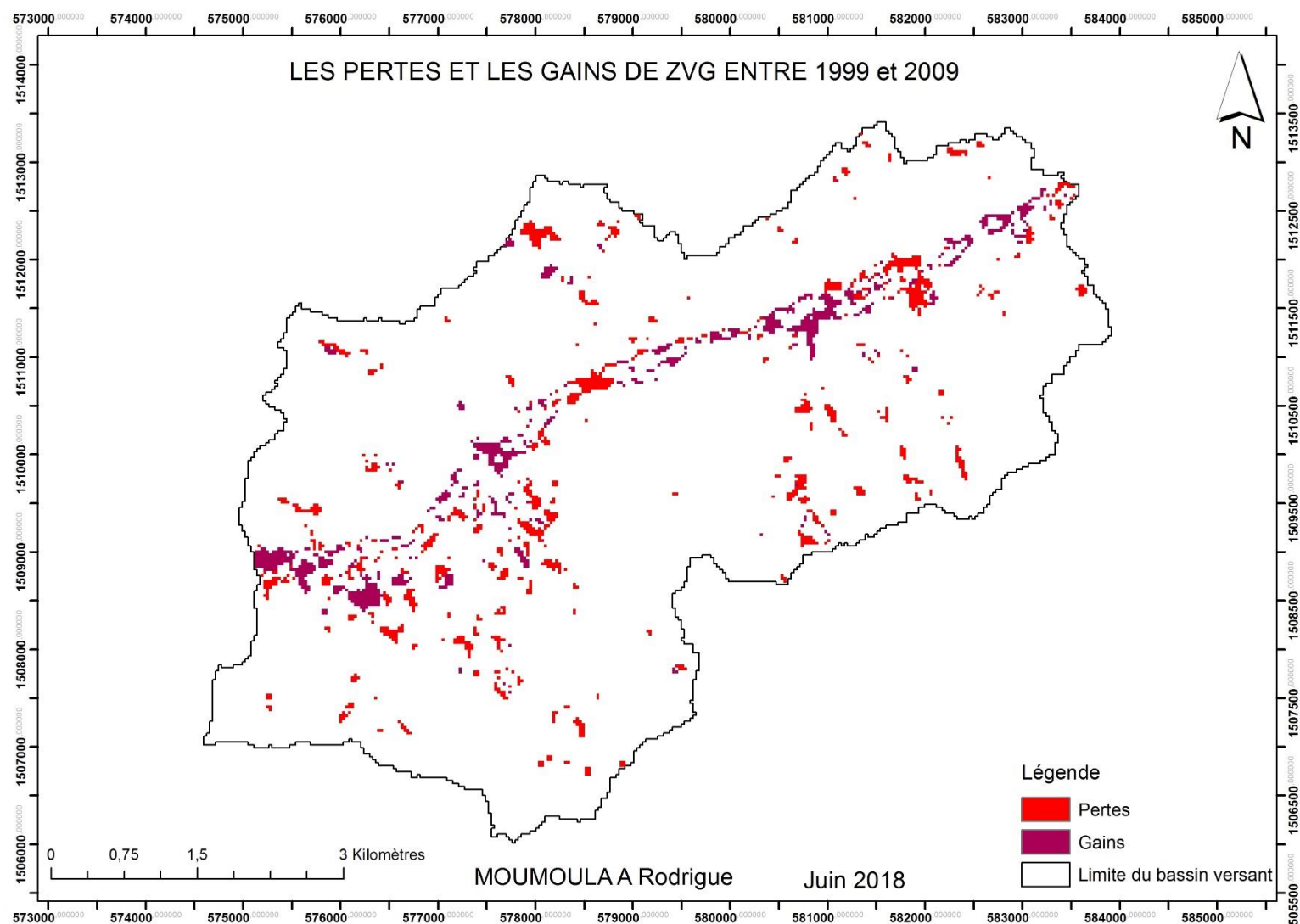
Annexe 11 : Cartographie des pertes et des gains des zones dégradées de 2009 à 2017



Annexe 12 : Cartographie des pertes et des gains des zones à végétation naturelle de 1986 à 1999



Annexe 13 : Cartographie des pertes et des gains des zones à végétation naturelle de 1999 à 2009



Annexe 14 : Cartographie des pertes et des gains des zones à végétation naturelle de 2009 à 2017

