

UNIVERSITE JOSEPH KI-ZERBO



ÉCOLE DOCTORALE LETTRES, SCIENCES HUMAINES ET COMMUNICATION (ED-LESHCO)

LABORATOIRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES SUR LES MILIEUX ET TERRITOIRES (LERMIT)

THESE DE DOCTORAT UNIQUE DE GEOGRAPHIE

OPTION : GESTION DES RESSOURCES NATURELLES

**VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION ET
STRATEGIES ENDOGENES DE LUTTE ANTIEROSIVE
DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU**

Présentée et soutenue publiquement le 10 janvier 2022

**Patindsaongo Zéphirin
KAGAMBEGA**

Sous la direction de

Pr Jean-Marie DIPAMA

Devant un jury composé de :

- Président** : **Tanga Pierre ZOUNGRANA**, Professeur Titulaire, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso ;
- Rapporteurs** : **Ernest AMOUSSOU**, Professeur Titulaire, Université de Parakou, Cotonou, Benin ;
- : **Salifou TRAORE**, Professeur Titulaire, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso ;
- : **Oumar KABORE**, Maître de Recherches, Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole, INERA/CREAF, Burkina Faso ;
- Directeur de thèse** : **Jean-Marie DIPAMA**, Professeur Titulaire, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso.

Année académique 2020-2021

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
DEDICACE	4
REMERCIEMENT	5
SIGLES ET ABREVIATIONS	8
RESUME	10
ABSTRACT	11
INTRODUCTION GENERALE	12
PREMIERE PARTIE :	14
CADRE THEORIQUE, METHODOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE	14
CHAPITRE 1 :	15
CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE	15
CHAPITRE 2 :	70
CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE	70
DEUXIEME PARTIE :	100
MANIFESTATION ET FACTEURS DE L'EROSION DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU.	100
CHAPITRE 3 :	101
CARACTERISATION SPATIALE DES FORMES D'EROSION HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU KOU	101
CHAPITRE 4:	115
FACTEURS DE L'EROSION HYDRIQUE DES SOLS DU BASSIN VERSANT DU KOU	115
TROISIEME PARTIE :	145
EFFETS INDUITS DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU ET STRATEGIE PAYSANNE DE LUTTE.	145
CHAPITRE 5 :	146
EFFET INDUITS DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU ...	146
CHAPITRE 6 :	158
PERCEPTION PAYSANNE ET STRATEGIE DE LUTTE ANTI EROSIVE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU	158
CONCLUSION GENERALE	176
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	180
ANNEXES	197
LISTE DES TABLEAUX	234

LISTE DES FIGURES	235
LISTE DES CARTES	237
TABLE DES MATIERES	239

DEDICACE

*A la mémoire de mon père KAGAMBEGA Bangre Jean Célestin, et
de mon frère KAGAMBEGA Wendpouiré Augustin.*

REMERCIEMENT

Cette thèse est le résultat de nombreux échanges scientifiques et de collaboration avec des personnes auxquelles nous aimerions exprimer toute notre reconnaissance.

Nous tenons à remercier en premier lieu notre directeur de thèse, le Professeur Jean-Marie DIPAMA qui, malgré ses multiples occupations, a accepté de diriger ce travail.

Vous avez été toujours disponible pour nous orienter et nous prodiguer des conseils aussi bien sur le plan académique que social. Ces années d'apprentissage auprès de vous ont été un honneur à travers lequel nous avons pu bénéficier de votre immense expérience, de vos conseils et de votre sagesse. Vous vous êtes personnellement investi pour nos sollicitations scientifiques, administratives et nos voyages d'études. Nous avons beaucoup appris de vous tant dans le domaine de la recherche que dans le domaine du savoir vivre. Merci pour nous avoir accepté tout ce temps et inculqué votre rigueur, votre sens du travail bien fait. C'est le moment de vous exprimer notre grande estime.

Notre gratitude va à l'endroit du Professeur Tanga Pierre ZOUNGRANA, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse. Vos conseils et suggestions au cours des séminaires doctoraux nous ont beaucoup aidés dans l'orientation et la structuration de la présente thèse.

Nos remerciements aux instructeurs de la présente thèse ; au Professeur Ernest AMOUSSOU, pour nous avoir consacré de votre temps en acceptant de juger ce travail. Au Professeur Salifou TRAORE, merci pour la pertinence des remarques et suggestions qui ont élevé la qualité scientifique de cette thèse. Au Docteur Oumar KABORE, merci pour votre rigueur dans la lecture de ce travail.

Nos sincères remerciements vont aussi au Pr Expédit W. VISSIN de l'Université d'Abomey Calavi au Bénin pour avoir accepté de nous accueillir au sein du laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (*LACEEDE*). Il nous est vraiment difficile de trouver les mots pour vous dire merci. Vos conseils et suggestions durant notre séjour nous ont beaucoup aidés dans l'orientation et la structuration de la présente thèse.

Nos remerciements vont également à l'endroit de l'ensemble du corps professoral du département de Géographie de l'Université OUAGA I Pr Joseph KI – ZERBO pour la formation acquise depuis la première année.

A toute l'équipe du Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Milieux et les Territoires

(LERMIT), nous traduisons à travers ces lignes notre reconnaissance pour ces moments d'échanges si fructueux. Il s'agit de Pr Tanga Pierre ZOUNGRANA, Pr François de Charles OUÉDRAOGO, Dr Lucien OUÉDRAOGO, Dr Lassane YAMÉOGO Dr Blaise OUÉDRAOGO, Dr Edwige NIKIEMA, Dr Jérémie ROUAMBA, Dr Abdoul Azise SODORÉ, Dr Salifou SANOGO, Dr Ferdinand BAKO, Dr Chantal KARAMBIRI, Dr Medina KARAMBIRI, Dr Noël GANSAONRÉ, Dr Isidore YANOOGO, Dr Korotimi SANOU, Dr Songanaba Julien ROUAMBA de l'université Norbert ZONGO également membres du LERMIT. Vous nous avez conseillés et encouragés durant ce parcours.

Un grand merci aux Docteurs Ernest AMOUSSOU, Henri Sourou VODOUNON TOTIN, Hervé KOUMASSI du Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Écosystème et Développement de l'université d'Abomey Calavi du Bénin pour les échanges, les orientations et surtout leurs critiques très constructives lors des différentes présentations que nous avons faites à chaque fin de séjour.

En tant qu'ingénieur de recherche affecté à L'Institut de Sciences des Sociétés, cette institution nous a naturellement servie de cadre de travail. Nous remercions le Directeur Dr Ludovic KIBORA ainsi que toute l'administration de l'institut pour leur soutien multiformes. Nous remercions particulièrement Dr Aude NIKIEMA pour nous avoir facilité le contact avec notre directeur de thèse, pour son encouragement et son appui par rapport à l'amélioration de notre travail.

Nous exprimons notre reconnaissance aux acteurs qui ont contribué au rassemblement des données analysées dans cette thèse. Il s'agit des Directions Régionales des ressources en eau, de l'agriculture, de l'environnement, de la police de l'eau, la CLE du Kou etc. Nous n'oublions pas les autorités administratives, religieuses et les populations riveraines du bassin versant du kou pour leur collaboration quant à la collecte des données primaires ainsi que notre équipe d'enquêteur : Mr Ali TRAORÉ, Mle Kadidia MILLOGO, Mle Awa SOW.

Nous sommes reconnaissants envers les instructeurs de cette thèse qui ont bien voulu consacrer leur temps à l'évaluation de ce travail de recherche et aux membres du jury pour avoir accepté de siéger dans le jury de soutenance.

Nous n'oublions pas nos camarades doctorants et jeunes docteurs du LERMIT, du Laboratoire de Cartographie de l'IRD et des membres de la salle cartographie de l'INSS que nous avons fréquenté durant ce parcours.

Aux familles KAGAMBEGA, ZONGO et DRABO, merci pour vos soutiens multiformes.

A mon épouse DRABO Amba Victorine, pour avoir supporté mes absences répétées, mes caprices et mes humeurs liés aux contraintes du travail.

Notre reconnaissance et toutes nos excuses à tous ceux qui auront été oubliés ou qui ont connu un désagrément quelconque de notre part du fait de la préparation de cette thèse.

Puisse chacun de vous trouver en ce document, le fruit de la confiance accordée, du sacrifice consenti.

SIGLES ET ABREVIATIONS

AE	:	Agence de l'Eau
ANAM	:	Agence Nationale de la Météorologie
AND	:	Conseil National de Secours d'urgence
BNDT	:	Base Nationale de Données Topographiques
CCD	:	Base Nationale de Données Topographiques
CES	:	Conservation des Eaux et des Sols
CLE	:	Comité Local de l'Eau
CCNUCC	:	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CPVQ	:	Conseil des Productions Végétales du Québec
CNE	:	Conseil National de l'Eau
CONASUR	:	Conseil National de Secours d'urgence
CONEDD :	:	Conseil National pour l'Environnement et du Développement Durable
DGAHDI	:	Direction Générale des Aménagements Hydrauliques et du Développement de l'Irrigation
DGRE	:	Direction Générale des Ressources en Eau
EC	:	Erreurs de Commission
ETCCDI	:	Groupe d'expert sur la détection et les indices du changement climatique
EO	:	Erreur d'Omission
ETM+	:	Enhanced Thematic Mapper
FAO	:	Food and Agriculture Organization
FIT	:	Front Intertropical
GIEC	:	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIRE	:	Gestion Intégrée des Ressources en eau
GEV	:	Loi des extrêmes généralisés
GPS	:	Global Positioning System
IGB	:	Institut Géographique du Burkina
INSD	:	Institut national de la statistique et de la démographie
INSS	:	INstitut des Sciences des Sociétés
IPC	:	Indice de Pureté des Classes

IVC	:	Indices de Validité Cartographique
LCM	:	Land Change Modeler
LERMIT	:	Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Milieux et Territoires
MAAH	:	Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
OLI	:	Operational Land Image
OMM	:	Organisation Mondiale de la Météorologie
ONEA	:	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
PADI	:	Programme d'Appuis au Développement de l'Irrigation
PAGIRE	:	Plan d'Action de Gestion Intégré des Ressources en Eau
PNUE	:	Programme des Nation Unies pour l'Environnement
PNGT	:	Programme National de Gestion des terroirs
SIG	:	Système d'Information Géographique
SAPHYTO	:	Société Africaine de Produits Phytosanitaires
SOFIB	:	Société de Fabrication Industrielle Baro
SOFITEX	:	Société de Fibre et Textile
SONACEB	:	Société Nationale de Cartons et d'Emballages du Burkina
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission/Mission de topographie radar de la navette
TM	:	Thematic Mapper
USGS	:	United States Geological Survey

RESUME

La dégradation de l'environnement est au centre des préoccupations des pays du Sahel. Le Burkina Faso est confronté à cette dure réalité car depuis le début de la décennie 1970, on assiste à la régression de la productivité des sols, aux pénuries d'eaux et à la disparition de la végétation. Le bassin versant du Kou situé dans la partie Ouest du pays est exposé à la dégradation due à de multiples facteurs dont les agressivités pluviométriques de ces dernières années, les conditions biophysiques et les modes d'exploitation des ressources naturelles. L'objectif global de cette thèse est d'analyser la vulnérabilité du bassin versant du Kou à l'érosion hydrique dans un contexte d'occurrence des extrêmes pluviométriques. Les méthodes utilisées sont basées sur le calcul des indices de pluie extrême, l'analyse fréquentielle des pluies extrêmes, les outils d'analyse spatiale, de la modélisation et les enquêtes socioéconomiques.

Les résultats montrent qu'au niveau du bassin versant, le total annuel des pluies (PRCPTOT) et les jours humides consécutifs (CWD) ont connu une baisse durant la période 1958-2017. Au même moment, les jours secs consécutifs (CDD), la hauteur maximale des précipitations d'un jour (Rx1day), le cumul maximal des précipitations de 5 jours (Rx5day), les jours très pluvieux (R95) et les jours extrêmement pluvieux (R99p) ont connu une hausse. On assiste à une forte régression des formations végétales et une augmentation de superficies de certaines unités comme les cultures, les habitations et les sols nus. La cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique du bassin versant du Kou a permis de distinguer trois classes de vulnérabilité multifactorielle. Les zones à faible vulnérabilité couvrent 19,1 % du secteur d'étude, les zones à moyenne vulnérabilité 55,49 % et celles à forte vulnérabilité 24,69 %. Le paysan perçoit bien les problèmes afférents à l'érosion et à la restauration de la fertilité des sols. Ces perceptions amènent les paysans à développer des stratégies endogènes de gestion durable des terres pour réduire leurs vulnérabilités. Il s'agit de la jachère, du buttage, du billonnage, des cordons pierreux, du zaï, l'assolement et la rotation des cultures.

Mots clés : Erosion hydrique, SIG, Technique endogène, Bassin versant, Burkina Faso

ABSTRACT

Environmental degradation is at the center of the concerns of the countries of the Sahel. Burkina Faso is confronted with this harsh reality because since the beginning of the 1970s, we have witnessed the regression of soil productivity, water shortages and the disappearance of vegetation. The Kou watershed located in the western part of the country is exposed to degradation due to multiple factors including the aggressive rainfall of recent years, biophysical conditions and natural resource exploitation methods. The overall objective of this thesis is to analyze the vulnerability of the Kou watershed to water erosion in a context of occurrence of extreme rainfall. The methods used are based on the calculation of extreme rainfall indices, frequency analysis of extreme rainfall, spatial analysis tools, modeling and socio-economic surveys.

The results show that at the watershed level, the total annual rainfall (PRCPTOT) and the consecutive wet days (CWD) have decreased during the period 1958-2017. At the same time, consecutive dry days (CDD), maximum 1-day rainfall (Rx1day), maximum 5-day cumulative rainfall (Rx5day), very rainy days (R95), and extremely rainy days (R99p) have been on the rise. We are witnessing a strong regression of plant formations and an increase in the areas of certain units such as crops, dwellings and bare soil. The mapping of areas vulnerable to water erosion in the Kou watershed has made it possible to distinguish three classes of multifactorial vulnerability. Low vulnerability areas cover 19.1% of the study area, medium vulnerability areas 55.49% and high vulnerability areas 24.69%. Farmers are well aware of the problems related to erosion and the restoration of soil fertility. These perceptions lead farmers to develop endogenous strategies for sustainable land management to reduce their vulnerabilities. These are fallowing, ridging, ridging, stone bunds, zai, crop rotation and crop rotation.

Keywords: Water erosion, GIS, Endogenous technique, Watershed, Burkina Faso

INTRODUCTION GENERALE

Le changement climatique dû à l'émission des gaz à effet de serre n'est plus à démontrer (Ardoin B., 2004). En effet, on assiste à une mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies et une tendance à l'augmentation des températures influant ainsi le régime des précipitations en Afrique (Bergaoui M., Alouini A., 2001 ; B. Ardoin B., 2004 ; Sighomnou D., 2004). Selon le GIEC (2013), la pluviométrie a subi une réduction de 20 à 40% entre 1968 et 1990, en référence de la période 1931-1960. Ce déficit pluviométrique prolongé est d'autant plus accentué dans le nord et au sahel. Malgré une atténuation de ce déficit à partir de 1995 et seulement dans la partie centrale et orientale du Sahel, ce déficit reste prégnant et, là où il s'est amoindri, il a laissé place à une variabilité interannuelle accrue (Ali A., Lebel T., 2009). En dépit de la diminution des précipitations, on constate une augmentation des écoulements au Sahel. Cette augmentation est due essentiellement à l'encroûtement des sols, à la disparition progressive de la végétation ligneuse et l'extension des surfaces cultivables (Mahé G., et *al.*, 2011 ; Albergel J., Valentin C., 1988).

Cette augmentation du ruissellement a aggravé et accéléré le processus de dégradation des sols par l'érosion hydrique (Albergel J., et Valentin C., 1988 ; Casenave A., Valentin C., 1989 ; D'Herbès J.M., Valentin C., 1996).

A l'instar de tout le Sahel, le Burkina Faso connaît de graves problèmes de dégradation des terres résultant de la combinaison des facteurs anthropiques (Collinet J., Valentin C., 1979; Serpenté G., et *al.*, 1992) et climatiques (Albergel J., 1987; Carbonnel P., Hubert P., 1992). L'érosion hydrique est la forme de dégradation la plus répandue dans le pays. Il va de l'érosion aréolaire et du décapage localisé jusqu'au ravinement. La faible épaisseur des sols et la précarité du recouvrement végétal, conjuguées au caractère torrentiel des pluies sont à l'origine de cette dégradation. Environ 50% du territoire burkinabé sont soumis à une érosion hydrique élevée à très élevée. Cependant, 30% des superficies sont peu concernés par ce phénomène (SP/CONNED 2010).

L'érosion hydrique, phénomène majeur à l'origine de la dégradation des sols et de la baisse de productivité des terres cultivables (Roose E., 1984), résulte de l'action de la pluie, aussi bien en milieu naturel que sous influence humaine (Kelley W., 1983). En conséquence, la problématique de l'érosion hydrique nécessite la recherche de solutions susceptibles d'assurer la conservation des sols. Le classement des terres en fonction de leur vulnérabilité à l'érosion

(Girard G., et *al.*, 1996), de même que la mise au point de modèles d'érosion régionale (Bou Kheir R., et *al.*, 2001), font partie des stratégies définies à cet effet. Dans le cas des deux dernières études citées, le caractère spatial de l'érosion hydrique est mis en évidence à partir de l'intégration de données multi-sources dans un système d'information géographique (SIG). La présente étude s'inscrit également dans cette dynamique sous le thème **«vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique et stratégies endogènes de lutte dans le bassin du Kou »**. Elle permettra de disposer d'une vue d'ensemble des zones menacées et de localiser les secteurs nécessitant une intervention prioritaire dans une perspective de gestion durable des sols.

Le document est structuré en trois parties. La première partie est relative au cadre théorique et méthodologique et géographique. La deuxième partie porte sur les manifestations et facteurs de l'érosion dans le bassin versant du Kou et la troisième partie est consacré aux effets induits de l'érosion dans le bassin versant du Kou et les stratégies paysannes de lutte.

PREMIERE PARTIE :

**CADRE THEORIQUE, METHODOLOGIQUE ET
GEOGRAPHIQUE**

La présente partie consacrée au cadre théorique, méthodologique et géographique comprend deux chapitres. Le chapitre 1 décrit le cadre théorique et méthodologique en faisant ressortir la problématique du sujet, les hypothèses, les objectifs et la clarification des concepts. Le point des connaissances des travaux effectués sur les différents aspects du sujet a été effectué à travers une synthèse bibliographique. De même, elle décrit la démarche adoptée pour aboutir aux différents résultats obtenus. Les méthodes consistent en la collecte des données et de leurs traitements à l'aide de méthodes statistiques, graphiques et cartographiques. Les résultats issus de ces traitements sont enfin analysés. Le chapitre 2 présente le cadre géographique de l'étude et décrit les caractéristiques physiques et socio-économiques du site d'étude

CHAPITRE 1 :

CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE

1.1. Cadre théorique

1.1.1. Etat des connaissances

Plusieurs travaux scientifiques ont abordé la problématique de la dégradation des terres, mais peu sont consacrés à la vulnérabilité des sols. La synthèse bibliographique réalisée dans le cadre de cette recherche se rapporte aux études ayant traité de l'érosion avec un accent particulier sur les causes de la dégradation des terres par érosion hydrique, la modélisation des risques d'érosion ainsi que les stratégies d'adaptations.

▪ Causes de la dégradation des terres agricoles par érosion hydrique

De nombreux facteurs sont à la base de la dégradation des terres. Lambin E., et *al.* (2013) en ont identifié quinze regroupés en deux catégories: les facteurs directs et les facteurs sous-jacents. Les facteurs directs sont la topographie, l'occupation des sols, l'érodibilité des sols, les ravageurs et maladies, la gestion durable des terres et le développement d'infrastructures. Les facteurs sous-jacents sont par contre la densité de la population, l'accès aux marchés, le régime foncier, la pauvreté, l'accès à des services de vulgarisation agricole, la décentralisation, les politiques internationales et l'emploi non agricole.

Pour Roose E., (1994), l'agriculture entraîne nécessairement une simplification de l'écosystème, une diminution de la production de biomasse, en particulier des litières et par conséquent, la réduction du taux de matières humiques du sol et la dégradation des horizons superficiels

Biaou F. (1995), affirme que, contrairement aux pays industrialisés et aux pays fortement urbanisés, la cause majeure de la dégradation de l'environnement reste jusqu'à présent l'agriculture. Pour Honlonkou A. (1999), les causes de la destruction de la végétation sont aggravées par les activités agricoles. Dans le même ordre d'idées, Demon A. (1991), indique que l'appauvrissement des sols relève des activités humaines.

Houedjissin C. (2001), pour sa part mentionne que l'exploitation continue des terres pendant des siècles a engendré la dégradation des sols ferralitiques (90 %) en raison de l'utilisation des pratiques culturelles traditionnelles.

Pour Toko M., Da Matha Sant' Anna A. (1999) ; Arouna O. et *al.*, (2011), « les activités humaines dominées par l'agriculture constituent les causes majeures de cette dégradation ». C'est dans ce contexte de vulnérabilité agricole, chargé de risques pour l'environnement que N'Douma (1996) cité par Tenté B. (2000), a montré que la pratique des feux de végétation après le défrichement des champs pour la production agricole a pour conséquences : la destruction du couvert végétal, l'érosion des sols et la baisse des rendements agricoles. Il s'en suit donc que les manifestations les plus visibles de la dégradation des écosystèmes sont le recul du couvert végétal, l'extension de l'érosion sous toutes ses formes et, à plusieurs endroits, la baisse généralisée de la qualité des eaux des cours et plans d'eaux (Houngbo E., 2008). Pour cet auteur, la durée des jachères devient de plus en plus courte et ne permet pas la régénérescence des sols. De même, Fangnon B., et *al.*, (2012), note que l'accroissement de la population entraîne une pression foncière qui se manifeste par une surexploitation du milieu et par conséquent, une dégradation de l'environnement, mettant en péril la durabilité de l'agriculture.

▪ **Cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique**

Guillobez S. et *al.*, (2000) dans leurs travaux sur le suivi de l'érosion au Burkina Faso, utilisation d'un modèle cartographique se sont basés sur les paramètres de la formule de Wischmeier afin de sélectionner les données de leur travail. Sept (06) principaux facteurs ont été retenus. Ce sont :

La susceptibilité des sols à l'érosion ;

L'utilisation des sols ;

L'agressivité de la pluviométrie ;

La charge animale ;

La densité de la population ;

Les aménagements antiérosifs.

Les données ont été acquises grâce à la numérisation des cartes pédologiques et d'occupation des sols puis elles ont ensuite été croisées sous Arc/Info pour obtenir la carte des zones équiprobématiques, qui est constituée de polygones délimitant des secteurs présentant des caractéristiques identiques décrivant le milieu agricole burkinabè. Les données humaines constituent la dimension temporelle du modèle, elles ont été limitées à la densité de population et à la charge en animaux. Un classement hiérarchisé a été utilisé pour chaque

paramètre. La vocation principale de ce modèle cartographique est de présenter aux décideurs un état qualitatif de l'érosion hydrique au niveau du pays. Malgré son caractère général, ce document constitue le piédestal de la sélection des facteurs qui seront pris en compte dans la réalisation du modèle de travail.

Dumas P. (2004) en décrivant les causes anthropiques de l'érosion en Nouvelle-Calédonie montre que la construction d'infrastructures et l'exploitation minière à ciel ouvert constituent les principales causes de l'érosion hydrique. Il considère que l'impact des mauvaises pratiques agricoles et de l'urbanisation est limité. L'objectif de ses recherches était de parvenir à cartographier les sols sensibles à l'érosion à l'échelle locale, puis à l'échelle fonctionnelle des bassins versants afin d'étudier le processus d'érosion et d'en évaluer l'impact potentiel sur les zones marines côtières. Pour ce faire, il a choisi une modélisation qualitative se basant sur une analyse multicritère combinant les facteurs de l'érosion les plus représentatifs : la pente, la nature du substrat et l'occupation du sol. Il est intéressant de noter que le facteur climatique n'a pas été retenu. En s'appuyant sur les travaux de Maurizot P., Delfau M. (1995), l'auteur estime que les probabilités d'occurrence des précipitations de fortes intensités sont également réparties spatialement en Nouvelle-Calédonie. Ainsi, il considère que l'agressivité des pluies est homogène depuis la côte jusqu'aux zones de montagne. La méthodologie utilisée consiste à intégrer et à croiser les données dans un SIG. A partir de ces données il extrait des indicateurs de sensibilité en fonction de leur contribution au phénomène de l'érosion. Trois facteurs ont été pris en compte :

- La pente regroupée en trois classes : faible, moyenne et forte.
- L'érodibilité des sols, en trois classes.
- L'occupation du sol, extraite des analyses par télédétection. Ce facteur permet de renseigner le degré de protection de la couverture des sols. Une fois la base de données géographiques constituée, l'auteur a choisi une structure maillée à laquelle il applique une analyse multicritère reposant sur des paramètres qualitatifs, permettant en combinant les différents facteurs d'érosion de distinguer quatre niveaux de sensibilité des terrains à l'érosion faible, moyen, fort et très fort. Le travail de Dumas, peut servir de repère pour la réalisation du modèle et l'implémentation du modèle.

Luneau G. (2006) : abordant dans le même sens, ses travaux visent à améliorer le modèle cognitif réalisé par Dumas P. (2004). De ce fait l'auteur a d'abord procédé à la mise à jour des données, ensuite une rencontre avec divers experts a conduit aux choix de nouveaux

indicateurs de l'érosion des sols. La composante climatique a notamment été rajoutée. L'approche utilisée pour la cartographie de l'aléa érosion est une évaluation multicritère, s'appuyant sur la pondération de chaque facteur avant d'effectuer leur sommation. L'avantage est donc de pouvoir moduler le poids de chaque paramètre. Cette méthodologie permet de construire un modèle qualitatif plus simple, permettant d'envisager et d'analyser plusieurs scénarii. Les données ont toutes été rééchantillonnées au pas de 30 mètres correspondant à la résolution des images satellitaires utilisées.

En fonction de ces indicateurs et après une phase de « standardisation », l'auteur a mis en place un modèle statistique par évaluation multicritère. Dans une dernière phase, un test a été réalisé suite aux traitements effectués sur une image satellite. Ce test a mis en évidence la difficulté de discrimination des objets en milieu tropical même avec des images à résolution spatiale très fine. Les résultats escomptés n'ont pas été satisfaisants du fait principalement que toutes les couches n'ont pas pu être précisées. Enfin, le calcul d'une régression linéaire a permis, dans une dernière étape, de valider la méthode par expertise et de proposer de nouvelles pistes de travail pour une amélioration future du modèle vers un outil dynamique. La démarche adoptée par Luneau pourra servir quant à l'extraction des informations concernant certains facteurs.

Bachaoui B. et al (2007) en travaillant sur la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le haut atlas Marocain, ont réalisé un Atlas de la ville de Béni Mellal (haut Atlas, Maroc). L'objectif visé était de développer une méthodologie utilisant la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) pour cartographier les zones à risque d'érosion hydrique afin de produire une carte de risque qui peut être utilisée comme document de référence pour les décideurs. La méthodologie adoptée a consisté à intégrer, dans un SIG, trois facteurs contrôlant l'érosion : la pente, la friabilité des matériaux et l'occupation des terres. La carte de risque d'érosion qui en est dérivée montre quatre zones de vulnérabilité à l'érosion hydrique : faible, moyen, fort et très fort. Les résultats obtenus correspondent bien aux observations qui ont été faites sur le terrain.

Ce travail montre l'intérêt de l'utilisation de la technologie de la télédétection et des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion. La carte du risque d'érosion élaborée pourrait constituer un document de base pour tout aménagement proposé.

▪ **Technique de conservation des eaux et des sols et lutte antiérosive**

La Gestion Durable des Terres cherche à éviter ou à inverser la dégradation des terres en ciblant des activités susceptibles de préserver et d'améliorer les capacités productives des terres arables, des forêts et des pâtures, à préserver l'intégrité des bassins hydrographiques et la capacité des couches aquifères à répondre aux besoins en matière d'approvisionnement en eau et autres usages (Liniger P. et *al.*, 2011).

Pour Roose E. et *al.*, (1993). Dans la zone soudano-sahélienne semi-aride, les techniques conventionnelles de réhabilitation des terres sont limitées et coûteuses. Roose E. et *al.*, ont donc paru intéressant d'étudier en détail le « zaï », une pratique traditionnelle mossi de récupération des terres dégradées par la culture ou le surpâturage, et de tester quelques améliorations des pratiques du zaï sur la production de sorgho (grain et biomasse) et sur la diversité des herbes (vingt-trois espèces) et arbustes fourragers (treize espèces) qu'elle permet de réintroduire progressivement. Des enquêtes au nord-ouest du Burkina ont montré l'intérêt, les limites (pluies de 400 à 800 mm/an) et la diversité des pratiques du zaï en fonction de la texture du sol et de la disponibilité en fumure organique et en main-d'œuvre. L'expérimentation pendant deux ans sur deux sols de potentialités nettement différentes (sol ferrugineux tropical superficiel et sol brun profond) a permis de comprendre l'importance de la réserve hydrique et du travail du sol, ainsi que des apports d'eau et d'éléments fertilisants, organiques et minéraux.

Roose et al, dans ce document ont également montré que : la restauration de la productivité du sol et la réhabilitation de la couverture végétale seraient donc plus rapides que la restauration des caractéristiques physico-chimiques du sol.

Selon Reij C., et Tiombiano T., (2003), la gamme de techniques proposée par la vulgarisation agricole pour moderniser l'agriculture et améliorer les rendements agricoles ne touchait qu'une petite fraction des producteurs. Les efforts de modernisation agricole de la période 1950 – 1980, notamment l'introduction de cultures de rente (coton et arachide), la culture attelée, le semis en ligne et les aménagements de CES n'avaient pas bien réussi. Le coton avait disparu. La culture attelée n'était que faiblement adoptée et plutôt utilisée comme outil d'extension des superficies cultivées que comme outil d'intensification. Les aménagements de CES basés sur des ouvrages en terre n'étaient pas bien entretenus et ont disparu rapidement, car les techniques choisies n'étaient ni appropriées, ni acceptables. Il y avait une forte extension des surfaces cultivées sur des terres marginales à l'agriculture, ce

qui contribuait à une destruction de la végétation et à une accélération du processus de l'érosion (Reij C., 1983).

Selon Marchal Y. (1977) "Dans le Yatenga les derniers grands défrichements ont eu lieu il y a une trentaine d'années et il ne demeure plus sur les collines cuirassées qu'un faible couvert arbustif qui constitue le pâturage aérien des troupeaux de chèvres et de moutons et le seul combustible pour les besoins ménagers. Partout ailleurs, l'espace est cultivé dans une proportion de 50% à 75% sur des terres sensibles à l'érosion". Face à cette situation qui s'aggravait, il y a eu diverses actions pour arrêter la dégradation des terres.

Belemviré A. *et al.* (2008) cité par Sanou P. (2016) a recensé les réalisations de lutte contre la dégradation développées par divers projets au Nord du plateau central et évalué les impacts. Il ressort de cette évaluation que pour minimiser d'une part les risques climatiques (irrégularité de la pluviométrie) et d'autre part garantir un niveau de production acceptable, les ONG, associations et projets se sont impliqués activement dans les actions de lutte contre la dégradation des terres à travers les reboisements, l'agroforesterie, les cordons pierreux et la conservation de la biodiversité. Il cite notamment le Projet Agroforestier (PAF) qui fut mis en place en 1981 dans le Yatenga pour inciter les paysans à aménager leurs propres champs. Il a ainsi été testé les techniques de demi-lune, des diguettes en tige de mil, en terre ou en cailloux suivant les courbes de niveaux. On peut citer aussi le Projet d'Aménagement des Terroirs et de Conservation des Ressources dans le Plateau central (PATECORE) et le Programme Spécial de Conservation des Eaux et des Sols et Agroforesterie (CES/AGF) créés en 1988 pour assurer l'objectif de conservation des eaux et des sols comme une composante à part entière.

Sanou P. (2016) constate cependant que le processus de dégradation demeure important et constitue une menace sérieuse pour la préservation de l'environnement. En effet, sur les trois périodes de son étude sur le Bam (1984-1990, 1990-2002 et 2002-2011) des sols se sont dégradés sur 14 à 18% des terres et la végétation s'est dégradée sur 18 à 21% des terres. La dégradation reste active à cause des champs non aménagés et aussi en raison de la vulnérabilité des terres à l'érosion. La situation des sols nus reste préoccupante ; ils sont passés de 58 000 ha en 1984 à 44 000 ha en 1990, 55 000 ha en 2002 et 45 000 ha en 2011.

Au regard de ces conclusions, peu rassurantes, il importe de faire un point non seulement sur le niveau de dégradation persistante des terres mais aussi sur la couverture du pays en

aménagements de conservation des eaux et des sols pour éventuellement élaborer une stratégie qui permettra de prendre convenablement la question de la dégradation des terres.

1.1.2. Clarification des concepts

Pour faciliter la compréhension de certains termes utilisés dans la présente étude, une définition des concepts utilisés s'impose. Cela permet de contextualiser la compréhension des idées développées.

Bassin versant :

Le groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour¹ définit le bassin versant comme une unité territoriale correspondant à l'ensemble du territoire qui alimente un cours d'eau. Les limites du territoire d'un bassin versant sont appelées les lignes de partage des eaux et sont constituées des sommets qui séparent les directions d'écoulement des eaux de ruissellement. La direction d'écoulement des eaux dans un bassin versant implique que ces eaux se dirigeront vers un exutoire commun (cours d'eau, lac, fleuve, océan). Les eaux souterraines, au même titre que les eaux de surface, font partie intégrante du bassin versant. L'écoulement des eaux dans le bassin versant se fait de l'amont vers l'aval au travers d'un réseau hydrographique (réseau de drainage) d'ordre plus ou moins important. Il comprend un cours d'eau récepteur (cours d'eau principal) et ses tributaires (cours d'eau qui se jette dans un cours d'eau de plus grande importance ou dans un lac). Chaque bassin versant est composé de plusieurs sous-bassins versants qui, à leur tour, sont également composés de sous-bassins.

Selon Ambroise B. (1999), le bassin versant est considéré comme un système, avec les précipitations comme entrées principales et les différents flux d'évapotranspiration et d'écoulements de surface et souterrains comme sorties. Ainsi, le fonctionnement hydrologique du bassin peut être marqué par des processus hydrologiques dominants ou des combinaisons de processus dominants qui varient dans l'espace et dans le temps.

Pour Pierre G. et Fernand V. (2009), le bassin-versant peut être défini comme un espace géographique alimentant un cours d'eau et drainé par lui. Il a pour axe le cours d'eau principal et pour limite la ligne de partage des eaux le séparant des bassins versants adjacents.

¹ <http://www.grobec.org/definition.php>

Cette dernière définition est retenue car elle répond au mieux à la notion de bassin versant dans le cadre de cette étude.

Vulnérabilité :

La vulnérabilité est un concept qui englobe un grand nombre de définitions (O'Brien K. et *al.*, 2007), mais qui s'avère pour la plupart du temps, demander une approche très globale (Sullivan A., et Meigh J. 2006). Cutter L. (1996), définit la vulnérabilité comme une formulation rhétorique permettant d'avertir d'un danger et des pertes qui pourraient l'accompagner. Par contre, Watson T. et *al.*, (1996) ; Klein T., et Nicholls J., (1999) la définissent comme la capacité d'un système à répondre aux contraintes et aux chocs qu'il subit.

Pour Blaikie P., et *al.*, (1994), on entend par vulnérabilité, les caractéristiques d'une personne ou d'un groupe en fonction de leur capacité à anticiper, à faire face, et à résister de se remettre de l'impact d'un aléa naturel. Elle est fonction du caractère, de l'ampleur et du rythme des variations climatiques auxquels un système est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (McCarthy J., et *al.*, 2001).

Pour le GIEC (2007), la vulnérabilité est le degré de capacité d'un système de faire face ou non aux effets néfastes du changement climatique (y compris la variabilité climatique et les extrêmes). Elle désigne ainsi la mesure dans laquelle un système est sensible « ou incapable de faire face » aux effets néfastes du changement climatique, qu'il s'agisse de la variabilité climatique ou des extrêmes météorologiques.

Passant en revue les différentes définitions de la vulnérabilité, Kaspersen E., et *al.*, (2005) concluent qu'il n'y a pas de conceptualisation unique de la vulnérabilité qui pourrait s'adapter à tous les contextes et à des fins d'évaluation. Le choix de la définition peut dépendre de son aptitude à une vulnérabilité particulière et de son interprétation de la politique ou de l'action (Downing et *al.*, 2006). C'est dans ce sens que Bougalem et *al.*, (2013) définissent la vulnérabilité des sols comme leur fragilité face aux agressions extérieures telles que le climat et les actions anthropiques. Elle dépend donc de facteurs intrinsèques et extrinsèques. Elle peut être hiérarchisée en fonction du degré d'exposition aux risques.

Cette dernière définition de Bougalem (2013) a été retenue dans le cadre de cette étude.

Dégradation des terres :

De nombreux auteurs définissent la dégradation des terres comme un mal qui annihile tout projet de développement lié à l'évolution, à la gestion et au maintien des ressources environnementales dans une harmonie dans un écosystème parfait. Pour La Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification (CNUCLCD, 1995), la dégradation des terres est considérée comme étant la diminution ou la disparition dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement, tels que:

- l'érosion des sols causée par le vent et/ou l'eau ;
- la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, et la disparition à long terme de la végétation naturelle;
- La détérioration de l'environnement terrestre et atmosphérique.

Pour le Fonds pour l'Environnement mondial (FEM, 2005), la dégradation des terres est : « toute forme de détérioration du potentiel naturel des sols qui altère l'intégrité de l'écosystème soit en réduisant sa productivité écologiquement durable, soit en amoindrissant sa richesse biologique originelle et sa capacité de résilience » La dégradation des terres doit être située dans un contexte spatial, temporel, économique et social. En fonction du contexte, l'idée qu'on a de la dégradation varie. Le sol étant le support de toute vie, la dégradation des terres peut être définie comme étant l'ensemble des phénomènes qui induisent la diminution de la qualité productive de celui-ci. Cette diminution peut être de façon progressive ou totale liée entre autres à l'action conjuguée des conditions climatiques défavorables et des pratiques anthropiques inadéquates.

Dans le cadre de la présente recherche, la dégradation des terres est le processus qui réduit ou qui détruit la capacité des terres pour la production agricole, végétale, animale et forestière.

Erosion hydrique :

Pierre. G (1984), définit l'érosion comme étant : « l'ensemble des phénomènes extérieurs à l'écorce terrestre (phénomènes exogènes) qui contribuent à modifier les formes créées par les

phénomènes endogènes (tectonique et volcanisme)». L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt. La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine de l'arrachage du transport et du dépôt de la terre enlevée. L'arrachage est dû à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement et le transport est assuré par ces eaux.

Selon Agossou I., et Odoulami L., (1994), c'est un processus hydro-géomorphologie très important qui affecte les habitations et infrastructures socio-économiques surtout en milieu urbain. Les sédiments transportés par les eaux de ruissellement sont déposés dans les sections d'égouts à basse vitesse surtout pendant les périodes de faible écoulement ce qui réduit la capacité de drainage des eaux et entraîne les inondations.

Pour Le Bissonnais Y. *et al* (2002), l'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes. Dans le cadre de cette recherche, l'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol. Elle peut être définie comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt.

1.1.3. Problématique

L'érosion rend improductifs près de 20 millions d'hectares de terre dans le monde chaque année et est devenue une question pertinente au niveau mondial (Grouzis M, 2012 ; UNEP, 2015). Depuis 1950, et plus spécialement depuis la longue période sèche (1970-1990), on constate une évolution profonde des paysages soudano-sahéliens d'Afrique Occidentale : dégradation du couvert végétal, dénudation, encroûtement et décapage des sols, augmentation du ruissellement, ravinement des versants, changement de régime d'écoulement des rivières et une aridification du micro climat régional (Mullard M., et Groene D., 1961 ; Marchal Y., 1979 ; Rosse E., 1985). En effet, les ressources naturelles qui constituent le capital de base pour la production subissent une intense dégradation suite à des facteurs d'ordres physique, agro-climatique et/ou anthropique (FAO, 1990). Les raisons fondamentales sont entre autres: la sécheresse, la pratique d'une agriculture extensive mais aussi l'accroissement démographique qui a entraîné une surexploitation des terres. A partir de 1990, plusieurs rapports ont estimé que l'Afrique allait connaître une catastrophe environnementale. Selon la FAO, entre 1990 et 1995, l'Afrique a été caractérisée par un taux annuel de déforestation de l'ordre de 0,7% soit plus du double de la moyenne mondiale (FAO, 2003). Scherr J., (1999) notait que plus de 65% des terres agricoles africaines étaient dégradées tandis que l'Atlas du PNUE sur la désertification (PNUE, 1997) s'appuyant sur les mêmes données, estimait que près de 30% du Sahel était touché par une dégradation des sols liée aux activités humaines. Parmi les formes connues de dégradation des sols, l'érosion est certes la plus manifeste (Dipama J-M., 1997).

Cette forme de dégradation des terres n'est pas sans conséquences sur l'environnement. Parmi les impacts néfastes on peut retenir : la baisse de fertilité des sols, le comblement des cours d'eau, des barrages et des digues, les inondations (Délusca K., 1998 ; Darra N., 2013).

De nos jours, le Burkina Faso connaît de graves problèmes de dégradation des terres résultant de la combinaison des facteurs anthropiques (Collinet J., et Valentin C., 1979; Serpentié G., et *al.*, 1992) et climatiques (Albergel J., 1987; Carbonnel P. et Hubert P., 1992). Au même moment, les surfaces cultivées ne cessent de croître. De 2009 à 2018, la superficie exploitée au Burkina Faso a augmenté de 1 519 364 ha soit de 32%. Elle a varié autour d'une tendance croissante en raison de 3,1% l'an. Les hausses annuelles les plus importantes sont obtenues en 2010, 2012 et 2016. L'année 2018 connaît une hausse de 178 695 ha (soit 2,9%) par

rapport à 2017 (MAAH, 2020). Cette expansion rapide des espaces agricoles conjugués aux événements pluviométriques extrêmes due au changement climatique qui se traduisant par des conditions climatiques incertaines, accélèrent l'érosion hydrique (Agoïnon N, 2006 ; FAO, 2016).

Selon Marchal Y., (1977), dans la partie nord et le plateau central du pays, les derniers grands défrichements ont eu lieu il y a une trentaine d'années et il ne demeure plus sur les collines cuirassées qu'un faible couvert arbustif qui constitue le pâturage aérien des troupeaux de chèvres et de moutons et le seul combustible pour les besoins ménagers. Partout ailleurs, l'espace est cultivé dans une proportion de 50% à 75% sur des terres sensibles à l'érosion.

Face à cette situation qui s'aggravait le gouvernement Burkinabè a entrepris plusieurs activités pour non seulement freiner la désertification (plantation d'arbres, lutte contre les feux de brousse et la divagation des animaux, sensibilisation des populations sur l'état de dégradation de l'environnement etc.), mais aussi pour récupérer les terres dégradées dans l'optique de restaurer l'équilibre écologique (intensification de l'agriculture, utilisation de la fumure organique, développement de nouvelles techniques agraires tirées des pratiques coutumières, etc.) (Sanou B., 2010). Malheureusement, la gamme de techniques proposée par la vulgarisation agricole pour moderniser l'agriculture et améliorer les rendements agricoles ne touchait qu'une petite fraction des producteurs. Aussi, l'introduction de cultures de rente (coton et arachide), la culture attelée, le semis en ligne et les aménagements de CES n'avaient pas bien réussi. Le coton avait disparu. La culture attelée n'était que faiblement adoptée et plutôt utilisée comme outil d'extension des superficies cultivées que comme outil d'intensification. Les aménagements de CES basés sur des ouvrages en terre n'étaient pas bien entretenus et ont disparu rapidement, car les techniques choisies n'étaient ni appropriées, ni acceptables (Reij C., et Tiombiano T., 2003). Il y avait une forte extension des surfaces cultivées sur des terres marginales à l'agriculture, ce qui contribuait à une destruction de la végétation et à une accélération du processus de l'érosion (Reij C., 1983). Sanou P. (2016), constate cependant que le processus de dégradation demeure important dans la partie nord du pays et constitue une menace sérieuse pour la préservation de l'environnement.

Le bassin versant du Kou, situé dans à l'Ouest du Burkina, a longtemps offert un état stable des ressources naturelles en raison d'un faible peuplement. Ce bassin intègre les forêts classées de Dindéresso, du Kou, de Kua et de Kuinima. Il est l'espace géographique qui contient le système d'eau associé à la rivière Kou, à ses affluents et aux sources de Nasso.

Malheureusement le bassin versant du kou va vite subir les conséquences des changements climatiques et l'arrivée massive de population venu du Centre et du Nord du pays à la recherche de terre fertile. Ce qui va contribuer fortement à dégrader les ressources du bassin. En effet, les modifications que subit le bassin versant du kou est imputable à la surexploitation de la plaine. Suite à l'aménagement du périmètre rizicole de la vallée du kou, l'Etat a procédé à l'installation des colons sur le périmètre depuis les années 1974. Aussi, il y'a eu une migration importante de la population des zones surpeuplées et dégradées vers le périmètre rizicole à la recherche de bonnes terres cultivables (Beauchemin C., et Schoumaker B., 2005). Ce qui a augmenté la densité de population du bassin versant du Kou (AEDE, 2004). Par ailleurs, depuis quelques années, la baisse générale de la pluviométrie a engendré une baisse du débit de la rivière Kou 2,3 m^{3/s}, en 1960 à 1,93 m^{3/s} en 1986 1,74 m^{3/s} en 1992 et 1.6 m^{3/s} en 2008 (Sogreah Ingénierie, 1993; Traoré F., et Gombert P., 1997 ; Lorenzini G., 2008).

De nos jours, on constate une détérioration du couvert végétal du fait de l'exploitation démesurée des terres qui entraine une inversion des tendances où les forêts font progressivement place à l'agriculture de subsistance. Les effets de l'action de l'homme ont influé négativement le milieu naturel dans de nombreux cas, entraînant ainsi une fragilité des écosystèmes forestiers et agricoles. Les zones nues, érodées et dégradées se multiplient dans le bassin versant du Kou avec un ensablement très caractérisé des cours d'eau.

Sous l'effet de la précarité, l'exploitation des ressources forestières est devenue l'activité principale de la majeure partie de la population. Les populations vivant sur le bassin versant du Kou sont à 85% agriculteurs et tirent leur subsistance de la forêt. Celle-ci est ainsi dévastée pour faire des champs ou pour ravitailler la ville de Bobo-Dioulasso en bois d'énergie, charbon de bois ou en bois de service. Selon Dilema (1998), cité par Yaméogo J., (2008) les besoins en bois de la ville de Bobo-Dioulasso sont évalués à 470 504 stères par an. Cette quantité dénote de l'ampleur des défrichements et l'étendue de la dégradation du bassin versant, notamment de la Forêt classée de Kuinima dont le taux d'occupation et de dégradation est estimé à 90,1% (Nikiéma A., et al., 2001).

Ainsi, la pression socio-environnementale et démographique menace gravement les potentialités en eau et en sols et constitue une préoccupation socioéconomique majeure avec cependant très peu d'études géographiques sur l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou. La plupart des travaux ont mis l'accent sur le plateau central, et le Nord du Burkina

(Mietton M., 1988; Marchal Y., 1983 ; Rocette M., 1989 ; Dugue, P. et *al.*, 1994 ; Roose E. 1994 ; Reij C. et *al.*, 1996 ; Zougmore R. et *al.*, 1999 ; Robert E. 2014).

Une bonne connaissance des milieux, en vue d'appréhender la vulnérabilité des sols à l'érosion et les possibilités de récupération des terres par des techniques adaptées, s'impose de plus en plus dans cette partie du Burkina Faso. La présente étude s'inscrit dans cette perspective à travers le thème « **Vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique et stratégies endogènes de lutte dans le bassin versant du Kou** ». La dégradation des terres par l'érosion hydrique impact sérieusement le milieu biophysique et le coût économique des travaux de restauration est énorme (P. Brabant, 2008). Il est donc nécessaire d'améliorer les connaissances sur l'érosion hydrique des sols.

La question principale de cette recherche est la suivante : **Quels sont les enjeux liés à la dégradation des sols du bassin versant du Kou ?**

Spécifiquement, il s'agit de savoir :

- Quel est l'état des lieux de l'érosion (dégradation) des sols ?
- Quelles en sont les principales causes ?
- Quels sont les effets induits ?
- Comment lutter efficacement contre l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou ?

1.1.4. Hypothèses de recherche

La question centrale de cette recherche est de connaître les enjeux liés à la dégradation des sols du bassin versant du Kou. De cette question se dégage l'hypothèse principale suivante : « le bassin versant du Kou est soumis à une érosion intense liée aux effets conjugués des extrêmes pluviométriques et de la dynamique d'occupation des sols ».

Cette hypothèse principale se décline en quatre hypothèses spécifiques ci-dessous

Hypothèses spécifiques

- les sols du milieu d'étude sont à un niveau élevé de dégradation ;
- l'évolution des événements pluviométriques extrême et la dynamique d'occupation des sols contribuent fortement à la dynamique érosive dans le bassin versant du Kou ;
- l'érosion des sols engendre des effets sociaux et environnementaux dans le bassin versant du Kou

- Des techniques endogènes permettent de faire face à l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant du Kou.

Pour s'assurer de la vérification des hypothèses ci-dessus émises, nous formulons les objectifs suivants.

1.1.5. Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette recherche est de déterminer la sensibilité des sols du bassin versant à l'érosion hydrique dans un contexte d'occurrence des extrêmes pluviométriques et de la dynamique d'occupation des sols.

Les objectifs spécifiques ci-dessous définis permettent d'atteindre l'objectif principal.

Objectifs spécifiques

- déterminer le niveau de dégradation des sols dans le milieu d'étude;
- analyser les facteurs de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou ;
- caractériser les incidences sociales et environnementales de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou ;
- examiner l'efficacité des techniques endogènes développées par les producteurs pour faire face à l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant du Kou.

1.1.6. Variables de recherche

Pour tester les hypothèses de recherche, des variables ont été définies selon les thématiques pour faciliter la collecte des données sur le terrain.

En ce qui concerne la première hypothèse, la variable niveau de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique a été développée.

La deuxième hypothèse spécifique a été testée grâce aux variables suivantes : Variabilité des paramètres climatiques et dynamique d'occupation des sols.

Pour ce qui est de la troisième hypothèse la variable identifiée concerne les effets de l'érosion hydrique.

Concernant la quatrième hypothèse les variables identifiées sont : les perceptions paysannes de la vulnérabilité de l'érosion hydrique et le niveau d'adaptation des systèmes humains aux risques d'érosion hydrique.

L'identification des variables et indicateurs est un élément capital pour la vérification des hypothèses spécifiques formulées. Le tableau n°1 montre le choix des variables et des indicateurs liés à chaque hypothèse spécifique.

Tableau 1 : Variables et indicateurs de l'étude

<p>Question principale de recherche : Quels sont les enjeux liés à la dégradation des sols du bassin versant du Kou ?</p> <p>Hypothèse principale de recherche : le bassin versant du Kou est soumis à une érosion intense liée aux effets conjugués des extrêmes pluviométriques et de la dynamique d'occupation des sols.</p> <p>Objectif principal de recherche : étudier la sensibilité des sols du bassin versant du Kou à l'érosion hydrique dans un contexte d'occurrence des extrêmes pluviométriques</p>				
Questions spécifique de recherche	Hypothèses spécifiques de recherche	Objectifs spécifiques de recherche	variables	indicateurs
Quel est l'état des lieux de l'érosion (dégradation) des sols ?	Les sols du milieu d'étude sont à un niveau élevé de dégradation	Déterminer le niveau de dégradation des sols dans le milieu d'étude	Niveau de vulnérabilité des sols à l'érosion	Impact de la précipitation sur la vulnérabilité des sols Impact de l'occupation des sols sur la vulnérabilité des sols Impact de la pente sur la vulnérabilité des sols Impact de l'erosibilité des sols sur la vulnérabilité Indice de vulnérabilité à l'érosion
Quelles en sont les principales causes ?	L'évolution des évènements pluviométriques extrêmes et la dynamique d'occupation des sols contribuent fortement à la dynamique érosive dans le bassin versant du Kou	Analyser les facteurs de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou	Précipitation	Indices d'extrême pluviométrie
			Température	Fréquence des précipitations Valeur des températures
			Dynamique d'occupation des sols	Evolution des unités d'occupations des sols de 1987 à 2017
Quels sont les effets induits ?	L'érosion des sols engendre des effets sociaux et environnementaux dans le bassin versant du Kou	Caractériser les incidences sociales et environnementales de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou	Effets de l'érosion hydrique	Quantité de sédiment; Occurrence des inondations ; Rendement agricole
Comment lutter efficacement contre l'érosion hydrique dans le bassin du Kou ?	Des techniques endogènes permettent de faire face à l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant du Kou.	Examiner l'efficacité des techniques endogènes développées par les producteurs pour faire face à l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant du Kou	Perception paysanne de la vulnérabilité à l'érosion hydrique	Niveau de connaissance des causes et des manifestations de l'érosion hydrique des sols ; Etat de connaissances sur de bonnes pratiques locales de conservation des eaux et des sols
			Niveau d'adaptation des systèmes humains aux risques d'érosion hydrique	-Stratégie développée par les paysans -stratégie institutionnelle et organisationnelle de prévention des risques d'érosion

1.1.7. Recherche documentaire

La recherche documentaire a consisté à faire l'état des lieux des connaissances sur le sujet. Ce qui a permis de mieux structurer le sujet et les thèmes abordés dans le présent travail. Elle a été essentiellement guidée par les sujets en rapport avec la variabilité climatique, la dynamique d'occupation l'érosion des sols et les techniques endogènes d'adaptation à l'érosion des sols etc. La recherche documentaire a été faite dans les centres documentaires de Ouagadougou, de Bobo-Dioulasso et de Cotonou. Les ressources documentaires des services déconcentrés, de la mairie, des ONG et du secteur privé ainsi que des ressources en ligne ont également été exploitées.

1.2. Données et méthode de recherche

Le choix du site d'étude, les outils et techniques de collecte et de traitement des données et les méthodes d'interprétation des résultats sont présentés dans cette partie.

1.2.1. Méthodes d'approches

L'approche adoptée dans le cadre de cette recherche est une combinaison d'approches quantitatives, qualitatives et systémique.

- **Approches quantitatives et qualitatives**

L'analyse de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique et les techniques endogènes de lutte ne sauraient être abordées à travers une approche quantitative exclusivement étant donné que les acteurs concernés sont les hommes qui ont des réalités sociales et économiques différentes (Dimon R. 2008). Pour mieux comprendre les perceptions des populations sur l'érosion hydrique des sols et les techniques endogènes qu'elles développent, une approche qualitative s'avère nécessaire (Ledoux B. 1994). L'approche utilisée a été basée en grande partie sur la population locale qui a des points de vue différents sur ce phénomène et le perçoit différemment.

▪ **Approche systémique**

L'analyse systémique en géographie s'ancre dans une tentative d'orienter cette discipline, science de l'interaction spatiale, par l'application de styles cognitifs adaptés, à prendre globalement en compte la dimension spatiale des problèmes à résoudre dans un écosystème sensible. Selon Atta (1994) cité par Kouassi H. (2000), tout espace géographique est une structure dont l'organisation est liée à plusieurs variables, la meilleure analyse ne peut être que globale, c'est-à-dire systémique. La théorie systémique affirme que tout est système, ou tout peut être conceptualisé selon une logique de système (Boundja C. 2014). Cette étude aborde entre autres l'analyse et la cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Il s'agit d'une approche systémique basée sur une méthode multicritères permettant de dresser des cartes indicielles numérisées. Ces cartes sont basées sur la relation entre les différents paramètres ayant une influence sur le phénomène érosion hydrique (pluviométrie, topographie, pédologie, occupation du sol). Elles permettent d'exprimer le niveau de vulnérabilité du bassin versant kou à l'érosion hydrique.

Ces différentes théories ont été abordées dans la littérature scientifique de même que les méthodes et outils utilisés dans l'analyse des questions relatives à l'érosion des sols.

1.2.2. Choix du bassin versant du Kou

Le choix de ce bassin versant se justifie par le fait qu'il est une zone de forte production agricole. Cette agriculture principalement de subsistance est axée presque essentiellement sur la production céréalière et cotonnière qui elle-même dépend des conditions climatiques extrêmes. Le bassin versant du kou comporte divers aménagements hydro-agricoles (bas-fonds, sources, puits/forages, retenues, barrages, rizières et autres périmètres irriguées, ...). Ce pendant le bassin est marquée par l'usage conflictuel des ressources naturelles entre l'agriculture, l'agro-pastoralisme, la production cotonnière ; mais surtout entre les différents agriculteurs et villages (le droit de possession de l'eau est un 'droit collectif', chaque village a sa tranche de fleuve).

Autre fait marquant est celui de la forêt classée du Kou. En effet, avec une superficie de 115ha (IUCN, 1994 cité par Traoré et Ouattara, 2004), elle abritait au minimum 10 sources (SOGREAH, 1994) dont quatre (04) seraient fonctionnelles aujourd'hui. Depuis quelques décennies, la dégradation des berges du Kou due à l'érosion surtout dans sa partie amont serait la principale cause de disparition de ces sources. D'autres raisons telles que les aléas climatiques ont sans doute contribué à leur disparition. L'accroissement de la population de la

ville de Bobo-Dioulasso et de ses environs a entraîné une augmentation des besoins de celle-ci en terre cultivable, en pâturage, en bois de chauffe et en charbon de bois. Cet état de fait a conduit les populations à occuper et à exploiter les berges du Kou pour les besoins ci-dessus cités. Cet empiètement de l'homme sur les berges du Kou a favorisé le déclenchement et l'aggravation de l'érosion.

1.2.3. Outils de collecte et de traitement des données

Divers outils de collecte de données ont été administrés :

- une grille d'observation pour apprécier sur le terrain, la conformité des travaux de laboratoire et la réalité observée. C'est une technique d'appréciation visuelle qui permet, grâce à la présence de certains éléments prédéfinis dans le milieu de porter un jugement sur des aspects liés aux travaux de recherche.
- un questionnaire adressé aux ménages agricoles portant sur la perception et le système de gestion de l'érosion hydrique des sols.
- un guide d'entretien adressé aux personnes ressources a permis d'accéder à des informations précises sur la vulnérabilité du bassin versant à l'érosion hydrique. Il comporte des questions ouvertes et semi-ouvertes, permettant de recueillir et de hiérarchiser les perceptions ou opinions des groupes.
- un appareil photo numérique pour les prises de vue lors des travaux de terrain;
- un GPS (Global Positioning Système) pour relever les coordonnées géographiques sur le terrain ;

Quelques logiciels et programmes ont également été utilisés :

- le logiciel Envi 5.1 pour le traitement des images satellites ;
- le logiciel ArcGIS 10.4 pour la cartographie
- idrisi pour la projection (simulation) de l'occupation des sols
- le programme "Pontius Matrix 22", se basant sur les matrices de transitions génère des graphiques pour montrer l'intensité des changements d'occupation des sols.
- KoBo collect, pour les enquêtes terrain ;
- le tableur Excel a été utilisé pour la représentation graphique des statistiques extraites des résultats d'enquêtes et cartographiques ;
- Arcswat et swat cup pour la modélisation de la production de sédiment
- Hyfran pour l'analyse fréquentielle ;

- Kronostat pour les tests de rupture de la série climatique ;
- Rclimdex pour le calcul des indices des extrêmes pluviométriques

1.2.4. Observation directe et travaux sur le terrain

Les observations directes sur le terrain ont porté sur les activités anthropiques et l'état du bassin versant. Pour ce faire, les travaux de terrain ont été organisés le long des transects. Les autres travaux sur le terrain ont porté essentiellement sur les enquêtes.

1.2.4.1. Echantillonnage

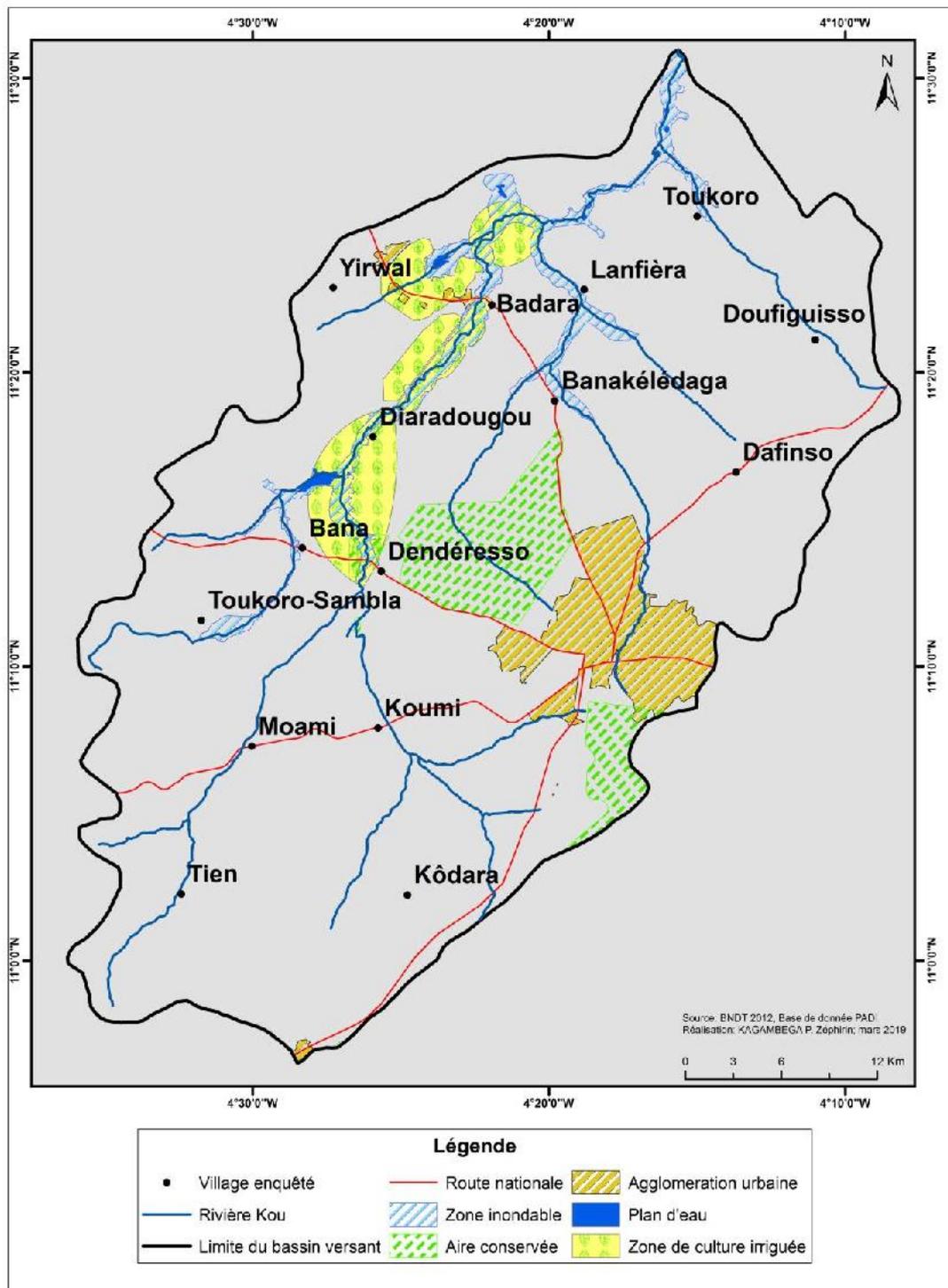
Il prend en compte deux aspects : l'échantillonnage spatial et l'échantillonnage démographique

1.2.4.1.1. Echantillonnage spatial

L'échantillonnage spatial a été réalisé par le choix des localités de collecte de données par questionnaire. Quinze (15) villages ont été choisis pour diverses raisons :

- La nécessité de prendre en compte l'ensemble du bassin versant ;
- La proximité des cours d'eau et des forêts classées ;
- Le niveau de dégradation des terres dans le bassin versant.

Carte 1 : Distribution spatiale des villages d'enquête dans le bassin versant du kou.



1.2.4.1.2. Echantillonnage démographique

L'échantillon démographique est composé essentiellement de la population agricole, éleveur, agropasteur et des représentants d'association agricole. La détermination de la taille de l'échantillon selon Schwartz (2002) cité par Koumassi (2014) se fait à partir de la formule suivante :

$$n = Z\alpha^2 \times p \times q / i^2$$

Où, **n** = taille de l'échantillon par village

Z α^2 = écart fixé à 1,96 correspondant à un degré de confiance de 95 %

P = nombre de ménages du village / nombre de ménages de la commune.

Q = 1 – P

i = marge d'erreur qui est égale à 5 %.

Ainsi, 397 ménages (tableau 2) ont été enquêtés sur un ensemble de 15 villages. Cet effectif représente sensiblement 10 % des villages d'étude. Le choix des personnes à interroger est basé sur les critères d'âge, de résidence et de connaissance du milieu

- avoir au moins quarante ans d'âge ;
- avoir vécu dans le milieu ces trente dernières années ;
- avoir une connaissance sur les différentes activités des populations ainsi que l'activité érosive dans le bassin versant.

La technique d'échantillonnage est de type raisonné. Ce choix se justifie par la volonté d'obtenir des informations fiables sur des évènements qui ne se produisent pas très fréquemment comme la variation climatique, l'évolution de l'occupation du sol, le processus érosif, etc.

A cela s'ajoutent les guides d'entretien qui ont été adressés aux responsables de l'administration locale, les services techniques et les organisations paysannes.

1.2.4.2. Observation directe sur le terrain

Les observations directes sur le terrain ont pour objectifs de collecter des informations qui permettront de faciliter l'interprétation des images satellites, de décrire les activités anthropiques et de déceler des traces d'érosion dans le bassin versant. Pour ce faire, Les

travaux de terrain ont été organisés le long des transects. Les informations relevées ont porté sur des observations directes du milieu naturel à savoir :

- le couvert végétal (indicateurs de pressions anthropique et animale)
- la géomorphologie (sommets, versants, bas-fonds, plaines, dunes, indicateurs d'érosion hydrique),
- les états de surface du sol, la texture du sol, la présence de blocs de cuirasse, de gravillons et d'autres marques d'activités humaines (champs, traces de piétinements d'animaux).

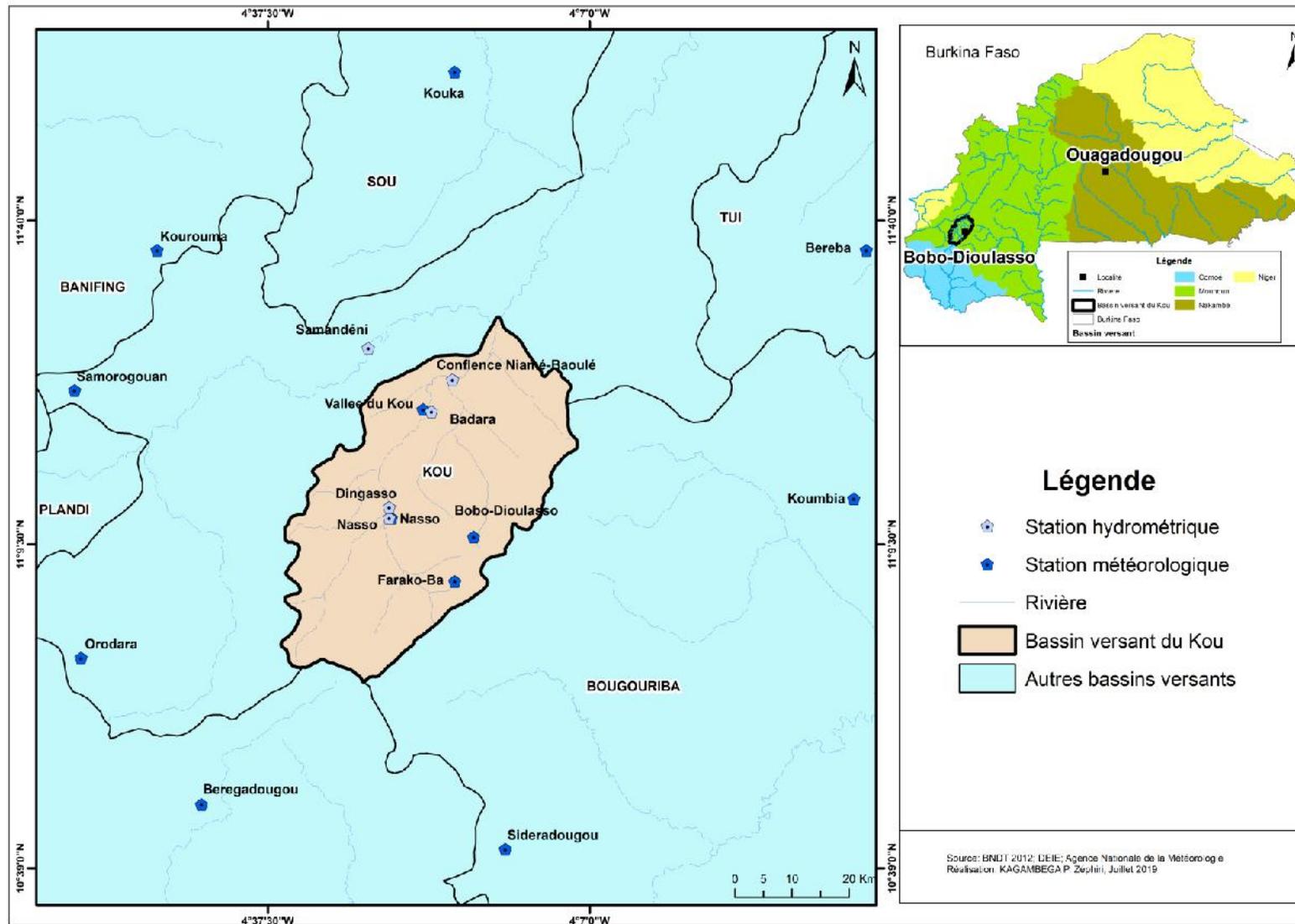
1.2.4.3. Natures et sources des données utilisées

Les données utilisées dans le cadre de cette étude concernent les statistiques climatologiques, hydrologiques, environnementales et socio-économiques, les données d'observations directes sur le terrain et d'enquêtes. Les données couvrent des périodes variables selon leur disponibilité.

1.2.4.3.1. Réseau d'observation hydrométéorologique

Le réseau d'observation hydrométéorologique exploité dans le cadre de cette étude comporte 12 stations météorologiques (01 station synoptique, 03 stations agronomiques et 08 postes pluviométriques) et 6 stations hydrométriques. La carte 2 montre la répartition spatiale de ces stations dans le bassin versant du Kou.

Carte 2 : Réseau d'observation hydrométéorologique au tour du bassin versant du Kou



1.2.4.3.2. Données climatiques

Les données climatiques ont été collectées auprès de de l'Agence Nationale de la Météorologie. Les chroniques climatologiques concernent :

- les hauteurs de pluie de 1950 à 2018 (journalière, mensuelle et annuelle) des stations météorologiques situées dans le bassin versant du Kou ou dans ses environnements immédiats ;
- les données d'évaporation potentielle, de températures maximales et minimales (mensuelles), d'insolation, de la vitesse du vent et de l'humidité relative de la station synoptique ainsi que les stations agronomiques.

L'évolution des paramètres climatiques a permis d'apprécier son influence dans le processus érosif des sols. Les perceptions locales de la variation des paramètres climatiques ont été confrontées aux données scientifiques. Cela a aidé à l'évaluation du rôle des variations climatiques dans le processus de l'érosion hydrique des sols. Enfin les données sur les scénarii futurs du climat RCP 4.5 et le RCP 8.5, ont été utilisées pour estimer les effets des modifications futures du climat et de la dynamique d'occupation du sol sur la production en sédiment du bassin versant du Kou. Le tableau 2 présente les coordonnées, la nature et l'altitude des différentes stations météorologiques utilisées dans le cadre de cette étude.

1.2.4.3.3. Données hydrologiques

Les données hydrologiques proviennent de la direction générale des ressources en eau (DGRE) et du Programme d'appuis au développement de l'irrigation (PADI). Elles sont constituées des débits journaliers et mensuels de 6 stations et couvrant la période de 1955 à 2014.

1.2.4.3.4. Données d'analyse spatiale

Les données utilisées dans cette étude sont constituées principalement de trois images satellitaires Landsat couvrant le bassin versant du Kou. Il s'agit du Thematic Mapper (TM) de 1987, Enhanced Thematic Mapper (ETM+) de 2002 et Operational Land Image (OLI) de 2017 avec une résolution de 30m. Elles ont été téléchargées sur le site web de United States Geological Survey (USGS) (<http://glovis.usgs.gov/>). En effet sept satellites Landsat sont

lancés entre 1972 et 1999 et un huitième le 11 février 2013. Suivant les années le satellite change de dénomination en témoigne les différents noms en fonction des années ci-dessus. Les instruments embarqués sur les satellites Landsat permettent de capturer plusieurs millions d'images. Celles-ci constituent des ressources uniques pour l'étude des changements climatiques, l'utilisation des sols, la cartographie, la gestion de l'habitat.

Pour tirer le meilleur de ces images, celles prises entre le mois d'octobre et de novembre ont été privilégiées. C'est une période où la couverture nuageuse est faible avec une bonne expression de la végétation liée à la fin récente de la saison pluvieuse. En effet, le traitement de ces images a fourni des données sur l'occupation du sol des années 1987, 2002 et de 2017. Il s'agit notamment : des forêts et galeries forestières, des forêts claires et savanes boisées, des savanes arborées et arbustives, des mosaïques de cultures et de jachères, des plans d'eau, la prairie. De nombreux travaux d'études ont démontré l'utilité des sources d'information satellites, notamment pour l'analyse de la biomasse et de l'occupation du sol (Gansaonré N. 2018).

Outre les images Landsat, les images ASTER (modèle numérique de terrain) de résolution 30m (<http://www.gdem.aster.jp>) ont été utilisées. Elles ont permis de ressortir la carte des pentes, de réseau hydrographique et de la densité de drainage.

Tableau 2 : Caractéristique des images Landsat

Capteur	Dates	Résolution	Bandes combinées
Landsat 5 TM	19 novembre 1987	30 m	4-3-2
Landsat 7 ETM	06 novembre 2002	30 m	4-3-2
Landsat 8 OLI-TIRS	10 novembre 2017	30 m	5-4-3

1.2.4.4. Estimation des champs de pluie

Parmi les méthodes couramment utilisées en hydro-météorologie pour estimer les précipitations sur des sites ayant peu ou aucune donnée, on peut distinguer d'une part, les méthodes d'interpolation spatiale (Delhomme P. 1978; Creutin D. et Obled C. 1982; Amani A., Lebel T. 1998) et, d'autre part, les méthodes d'analyse de fréquence régionale (Hosking M. et *al.*, 1985; Ouarda J. et *al.*, 1999) pour les crues, et (Alila Y. 1999) pour les précipitations. Les méthodes d'interpolation utilisent des approches géométriques (la méthode de trois stations les plus proches, les polygones de Thiessen) ou les fonctions de corrélation

spatiale (krigeage) pour estimer à un site cible la précipitation associée à un événement ou à une fréquence donnée.

Dans les méthodes généralement proposées pour calculer la moyenne des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin versant ou à proximité, on distingue la méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen ou l'utilisation d'isohyètes. Le choix de la méthode dépend notamment de la longueur de la série de données dont on dispose, la densité du réseau de mesure, et la variation du champ pluviométrique.

Pour estimer la lame d'eau précipitée, la méthode de polygone de Thiessen a été choisie. Le choix de cette méthode a été motivé par son application aisée et qu'elle donne en général de bons résultats. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement.

Cette méthode, basée uniquement sur les pluies observées aux pluviomètres, consiste à attribuer à chaque pluviomètre une zone de couverture présumée telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près en distance horizontale de ce pluviomètre que de toute autre. Les éléments de surface plus proches d'un pluviomètre que de tout autre, sont déterminés par le réseau des médiatrices des segments joignant les postes deux à deux.

La précipitation moyenne pondérée P pour le bassin versant se calcule alors en effectuant la somme des précipitations P_i de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire S_i), le tout divisé par la surface totale S du bassin versant. La précipitation moyenne sur le bassin versant s'écrit :

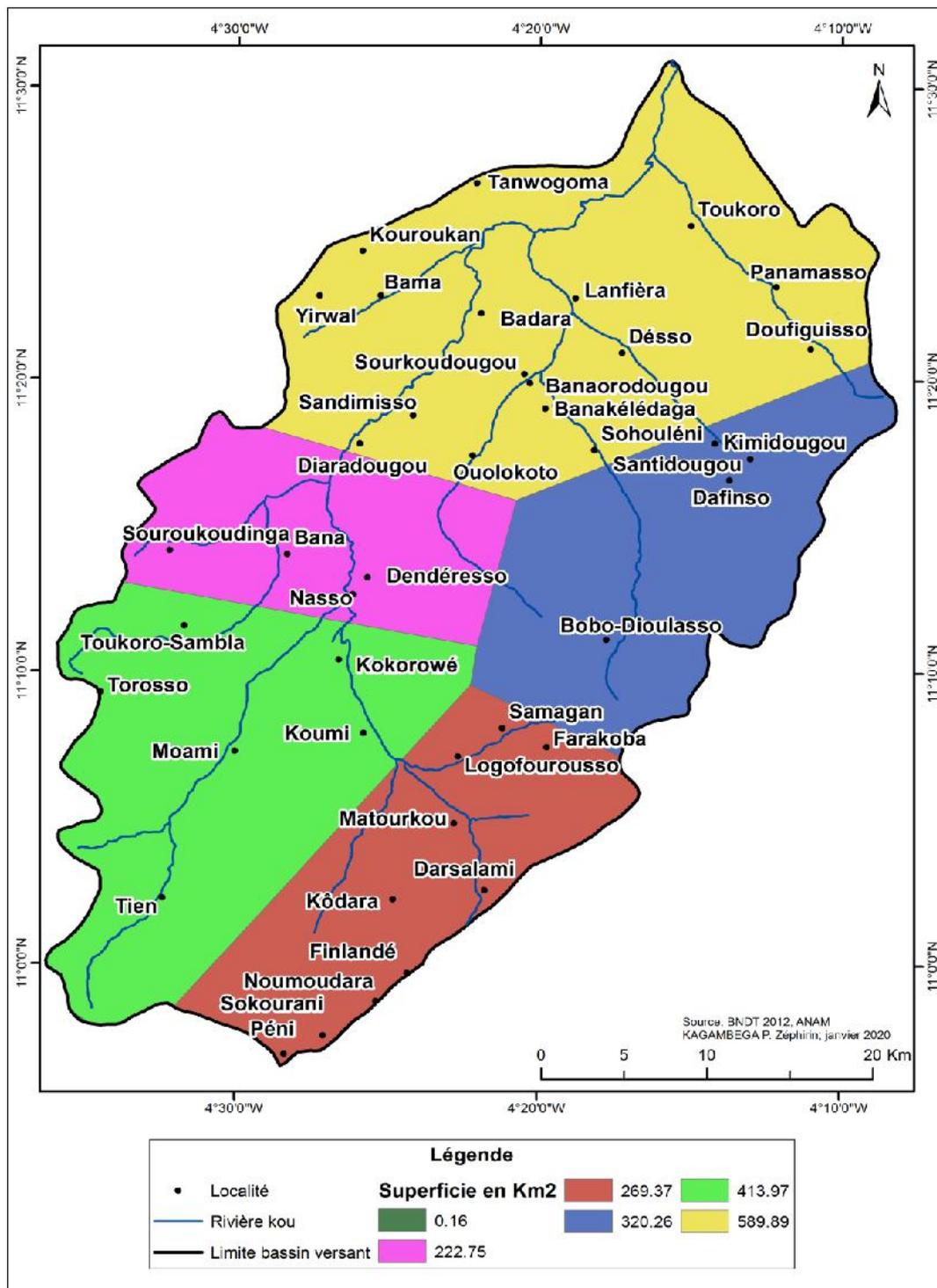
$$P = \frac{\sum P_i S_i}{S}$$

P_i : précipitation de la station à l'intérieur du polygone

S_i : surface du polygone

S : surface totale du bassin versant

Carte 3 : Polygone de thiessen



1.2.4.5. Calculs des indices d'extrême pluviométrique

Le groupe d'expert sur la détection et les indices du changement climatique (ETCCDI) a défini un ensemble d'indices descriptifs des extrêmes. Ces indices décrivent les caractéristiques particulières des extrêmes, notamment l'amplitude, la fréquence et la persistance. L'ensemble de base comprend 27 indices extrêmes pour les précipitations et la température. Plusieurs de ces indices sont basés sur des percentiles avec des seuils fixés pour évaluer les extrêmes modérés qui se produisent généralement quelques fois par an plutôt qu'un grand impact, une fois par décennie, des événements météorologiques. Les seuils de percentile pour les précipitations sont calculés à partir de l'échantillon de tous les jours humides de la période de base et pour la température, ils sont calculés à partir des fenêtres de cinq jours rencontrées chaque jour civil pour tenir compte du cycle annuel moyen. La raison pour laquelle on a choisi principalement des seuils centiles plutôt que des seuils fixes est que le nombre de jours dépassant les seuils centiles est plus uniformément réparti dans l'espace et est significatif dans chaque région. De tels indices permettent de suivre directement les tendances de l'intensité ou de la fréquence des événements.

Les 27 indices visent à suivre l'évolution des extrêmes "modérés" et à améliorer les études sur les extrêmes climatiques en utilisant des indices qui sont statistiquement forts, couvrent un large éventail de climats et ont un grand rapport signal/bruit (Min K. et *al*, 2011). Ils sont calculés à partir des données de précipitations quotidiennes (Peterson C. et *al*, 2002 ; Karl R., Easterling R. 1999). Parmi les principaux indices extrêmes, 7 indices de précipitations extrêmes ont été sélectionnés pour la présente étude (tableau 3). Ces indices sont ceux qui sont susceptibles d'être liés aux coulées de débris et provoquer l'érosion des sols.

Tableau 3 : Indices des extrêmes pluviométriques

Identification	Nom de l'indice	Définition	Unité
PRCPTOT	Total annuel des pluies	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux (RR = 1,0 mm)	mm
RX1day	Hauteur maximale des Précipitations d'un jour	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux	mm
RX5day	Cumul maximal des précipitations de 5 jours	Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année	mm
R95p	Jours très pluvieux	Précipitation totale annuelle avec précipitation > 95 ^e percentile	mm
R99p	Jours extrêmement pluvieux	Précipitations totales annuelles avec les précipitations > 99 ^e percentile	mm
CDD	Jours secs consécutifs	Nombre maximal des jours consécutifs avec précipitations journalières < 1 mm	jour
CWD	Jours pluvieux consécutifs	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières ≥ 1 mm	jour

Les indices centiles ont été calculés en utilisant une chronique de 60 ans (1958 – 2017). Lors de l'estimation des tendances des indices basés sur les percentiles, RCLimDex utilise l'approche de "boot-strapping" pour éviter un éventuel biais au sein de la période de référence associé à l'hétérogénéité existante (Zhang X., Yong F. 2004). Au cours du processus de calcul, des exigences particulières en matière de données doivent être respectées afin de calculer la valeur des indices à l'aide de RCLimDex. Une valeur annuelle est considérée comme incomplète si plus de 15 jours manquent dans une année. Une année ne sera calculée que lorsque tous les mois sont présents. Un indice de base percentile ne sera calculé que si 70 % des données sont présentes au moins au cours de la période de référence.

1.2.4.6. Analyse fréquentielle

L'objectif de cette analyse est de déterminer la fréquence d'occurrence des événements pluviométriques extrêmes dans le bassin versant du Kou.

Meylan P. et Musy A. (1999) définissent l'analyse fréquentielle comme étant une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future. C'est une méthode basée sur la définition et l'adoption d'un modèle fréquentiel, représenté par une équation qui décrit le comportement statistique d'une série d'événements : c'est le modèle qui décrit la probabilité de survenance d'événements hydroclimatiques donnés. C'est aussi un outil de base qui permet de faire l'analyse de la probabilité de survenance d'un événement hydroclimatique extrême.

L'analyse fréquentielle permet l'estimation de l'ampleur de l'événement dans le temps T_x auquel s'associe une période de retour T (quantile de période de retour T ou de probabilité au dépassement $p = 1/T$). L'approximation T^x de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité $F(x; \theta)$ à un échantillon de n observations $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, où θ symbolise le vecteur de paramètres associé à la répartition de probabilité F .

La disposition des séries de débits ou de séries pluviométriques sur une période déterminée permet de faire l'estimation de la probabilité de survenance d'un événement hydroclimatique extrême. L'événement climatique enregistré a été échantillonné pour l'identification de valeurs des hauteurs pluviométriques journalières annuelles maximales sur la période 1958 à 2017. L'événement ayant fait l'objet d'échantillonnage est ajusté à une loi de probabilité, d'où les fonctions :

- répartition $F_Q(q)$, qui représente la probabilité que la variable Q ait une valeur inférieure à q , ce qui équivaut à l'équation suivante :

$$F_Q(q) = P [Q \leq q].$$

- de densité de probabilité $f_Q(q)$ qui est une symbolisation de la probabilité de survenance d'un débit q élémentaire déterminé par l'équation : $F_Q(q) = P[q \leq Q < q + dq]$ Où dq est une variable élémentaire de Q .

La probabilité de non survenance d'un débit excédant la valeur de q est définie par l'équation

$$F_Q(Q) = P [Q \leq q] = \int_0^q f_Q(q) dq$$

La probabilité de survenance d'une crue, avec un débit excédant la valeur de q est transcrite par l'équation :

$$P [Q > q] = 1 - F_Q(q) = 1 - \int_0^q f_Q(q) dq.$$

Il est nécessaire de se focaliser sur la série de débits et des précipitations pour l'acquisition des informations de base pour une bonne prévision des événements hydroclimatique. Selon Koumassi H. (2014) et Wankpo I. (2019) la détermination de la probabilité de survenance d'un débit ou d'une précipitation passe par :

- l'échantillonnage de la série de débits et de précipitations ;
- la vérification des hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité ;
- le choix d'une loi statistique ;
- le contrôle de l'ajustement ;
- l'analyse des incertitudes.

Deux méthodes servent à la détermination de l'échantillon concerné. La première consiste à identifier les valeurs maximales journalières annuelles et la seconde porte sur l'identification des valeurs supérieures à un seuil.

1^{ère} méthode : identification des valeurs maximales annuelles

Cette méthode permet de faire la sélection au niveau de chaque année de la variable maximale. A travers les saisons pluviométriques, l'année représente les différents événements qui caractérisent les faits physiques, source d'écoulement.

2^{ème} méthode : identification des valeurs supérieures à un seuil

C'est une méthode de sélection des valeurs supérieures au seuil choisi. Cette sélection découle exclusivement de ce seuil qui a été très difficile à identifier. Plus le seuil identifié est faible, plus nombreuses sont les crues obtenues. Les maxima deviennent dépendants les uns des autres suite à leur appartenance au même événement. Quand le seuil est plus élevé, la série devient de plus en plus courte et les maxima de plus en plus indépendants.

- Vérification des hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité

L'hypothèse d'indépendance est un test qui conduit à la vérification de l'absence d'autocorrélation entre les débits. Lorsque l'échantillonnage est réalisé avec des valeurs dépassant le seuil, il importe d'avoir recours au test d'indépendance puisqu'il existe la probabilité que deux débits consécutifs soient dépendants.

Homogénéité et stationnarité sont des tests qui consistent à faire une vérification de la source des informations afin de confirmer qu'elles proviennent des mêmes conditions d'écoulement et du même phénomène. Ce sont des hypothèses émises qui peuvent faire objet de vérification à base des tests statistiques avant leur validation.

- Choix d'une loi statistique

C'est une loi qui permet de faire la prévision d'une probable survenance des crues ou d'une précipitation à base de la fonction de distribution des débits ou précipitation $f(Q)$ ou de la densité de probabilité $f(Q)$. L'ajustement de la loi statistique à la série de débits échantillonnée ($q_1; q_2; \dots; q_N$) est réalisé à partir de la détermination d'un échantillon ordonné selon lequel se calcule la probabilité au dépassement p ou la probabilité au non dépassement q traduite par la formule ($q = 1-p$).

Le calcul de la probabilité au non dépassement des pluies ordonnées peut s'effectuer à base de nombreuses formules empiriques. Mais celle retenue dans cette étude de Cunnane C. (1989) déterminée par l'équation :

$$q = \frac{k-a}{n-2a+1} \text{ avec,}$$

k qui représente le rang des observations rangées du plus petit au plus grand, n la taille de l'échantillon et $a = 0,4$ une constante de la formule. L'extrapolation des valeurs s'est faite à partir du modèle théorique déduit de la loi statistique ajustée. Elle a permis d'acquérir des valeurs des quantiles de valeur X_r de r pour une période T de retour. L'équation ci-dessous a permis d'établir entre la probabilité au non dépassement et la période de retour la relation qui existe entre eux :

$$T = \frac{1}{1-q}$$

- Choix du modèle fréquentiel

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Diverses pistes peuvent contribuer à faciliter ce choix. Ce choix de modèle est relativement lié à l'évolution de la probabilité des grandes valeurs suivant leur vitesse. Deux de ces lois sont utilisées dans le cadre de cette étude.

Loi des extrêmes généralisés (GEV)

Encore appelée distribution statistique de Gumbel, la loi GEV favorise la description de l'évolution statistique des extrêmes. Selon Gumbel J. (1958) cité par Meylan P. et Musy A. (1999), c'est une loi exponentielle double. Elle représente la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de n valeurs. Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières, cette loi doit ainsi être capable de décrire les séries de maxima annuels. Elle s'exprime par l'équation :

$$f(x) = \exp\left(-\left(1 - c \frac{x-a}{b}\right)\right) 1/c \quad \text{Avec,}$$

a un paramètre de position, b un paramètre d'échelle, c un paramètre de forme et x la variable des hauteurs de pluie et des débits.

La fréquence d'apparition des événements est traduite par l'inverse du temps de retour T de l'événement.

Le temps de retour T d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement. Il se traduit par la formule :

$$T = \frac{1}{1 - F(x)}$$

La définition de la loi par la technique d'ajustement consiste à faire des tracés à base d'une équation simple. C'est une méthode qui se focalise sur l'expression d'un quantile par l'équation de la droite (D) à deux inconnus. Cette droite est ensuite tracée dans un système d'axes ($x ; y$) à partir duquel il a été tracé la droite qui passe par le milieu de ces points afin de déterminer les deux paramètres a et b établissant la loi.

- Loi de Pearson

La loi de Pearson ou loi de Gamma incomplète fixe avec priorité la valeur du paramètre de positionnement X_0 à zéro en maintenant toujours Q pour variable débit, $u = a$. Q est considéré comme une variable réduite, avec $\alpha = \frac{1}{s}$ qui représente le paramètre d'échelle. La fonction de répartition conditionnée par cette loi est déterminée par la fonction :

$$F(Q) = \frac{\alpha \lambda}{\Gamma \lambda} \int e^{-\alpha Q q^{\lambda-1}} dq$$

Avec la limite supérieure qui est de Q et celle inférieure 0 .

Avec l' λ est calculé à partir d'une fonction complexe:

$$g(\lambda) = \log Q_m - \sum \log \frac{Q_i}{N}$$

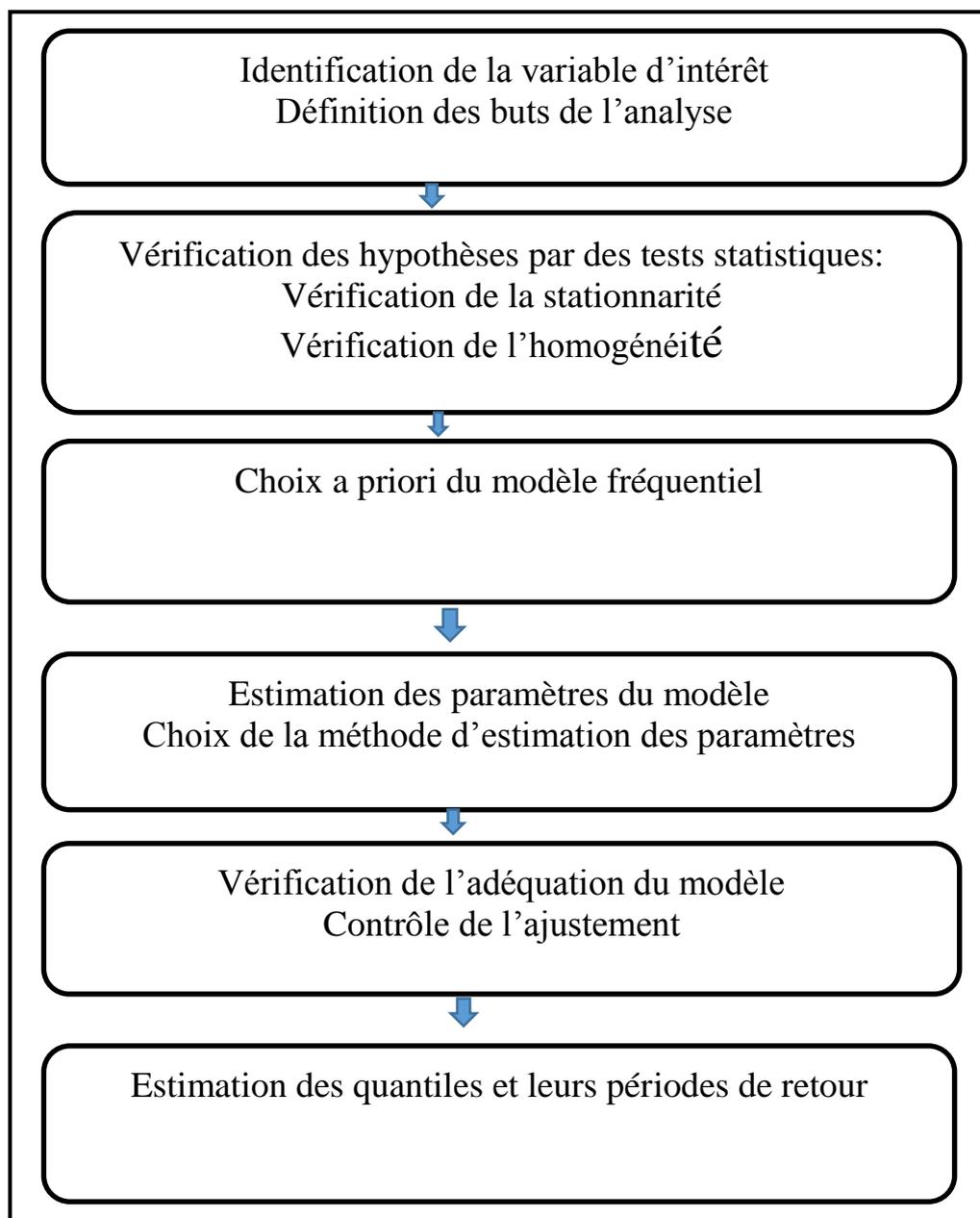
- Contrôle de l'ajustement

L'examen visuel du graphique représentatif de l'ajustement réalisé, même s'il peut paraître rudimentaire, reste un des bons moyens pour juger de la qualité d'un ajustement et devrait toujours constituer un préambule à tout test statistique. Un contrôle plus rigoureux doit être effectué avec des tests comme :

Le test d'Anderson-Darling qui consiste à comparer la distribution théorique à la distribution expérimentale ;

Le test de Kolmogorov-Smirnov qui consiste à mesurer, pour une variable aléatoire continue, la plus grande distance entre la distribution théorique et la distribution expérimentale. Ces tests servent à juger si un échantillon provient d'une population qui suit une loi de distribution donnée (Koumassi H. 2014). Les différentes étapes de l'analyse fréquentielle sont présentées dans la figure 1

Figure 1 : Principales étapes de l'analyse fréquentielle



Source : D'après de Benyahy L. et al (2004), cité par Koumassi H. (2014)

1.2.4.7. Evaluation de la dynamique d'occupation des sols dans le bassin versant du Kou

1.2.4.7.1. Le protocole de traitement des images satellites Landsat

Le traitement des images Landsat a permis d'avoir des informations spatiales sur la zone d'étude. Ce traitement a connu plusieurs étapes.

- **Composition colorée**

Elle est très efficace car elle permet d'analyser à un coup d'œil la combinaison de trois bandes spectrales en faisant varier de 0 à 255 les composantes rouges, verte et bleue définissant la couleur d'un pixel d'une image numérique. L'image ainsi obtenue est appelé une image multi spectrale. Mais avant toute exploitation d'images satellitaires, des prétraitements sont nécessaires pour corriger les distorsions géométriques et radiométriques liées aux plates-formes et capteurs spécifiques. Dans le cadre de cette étude, les images n'ont pas eu besoin d'une correction géométrique car elles sont déjà géométriquement rectifiées et géoréférencées dans le système de projection WGS 84 UTM zone 30 Nord par le fournisseur.

La composition colorée qui a été privilégiée dans notre cas pour la détermination des unités d'occupation du sol est celle en fausses couleurs standard. Elle combine les bandes du proche infrarouge, du rouge et du vert du capteur respectivement au plan d'affichage rouge, vert et bleu de l'écran. Cette composition, très efficace pour l'analyse de la végétation, présente l'avantage pour l'interprète d'avoir pratiquement les mêmes propriétés que les photographies infrarouges en couleur, utilisées depuis longtemps par les photo-interprètes. Dans Envi, la composition colorée a été réalisée après regroupement des différentes bandes ou création d'une image en format «.img ». Elle a été la combinaison 4-3-2 pour les images landsat 5 TM et landsat7 ETM+. La combinaison 5-4-3 a été appliquée pour l'image landsat 8 OLI-TIRS où les bandes 5 (Proche-infrarouge), bande 4 (Rouge) et bande 3 (Vert) correspondent respectivement aux bandes 4 (Proche infrarouge), bande 3 (Rouge) et bande 2 (Vert) des deux images landsat 5TM et landsat 7ETM+.

- **Extrait des compositions colorées des images landsat 1987, 2002 et 2017**

Les figures 2 ; 3 et 4 présentent des extraits de la composition colorée des images landsat 5 TM de 1987, Landsat 7ETM+ de 2002 et Landsat 8 OLI – TIRS de 2017.

Figure 2 : Composition colorée 4-3-2 de l'image Landsat 5 TM de 1987

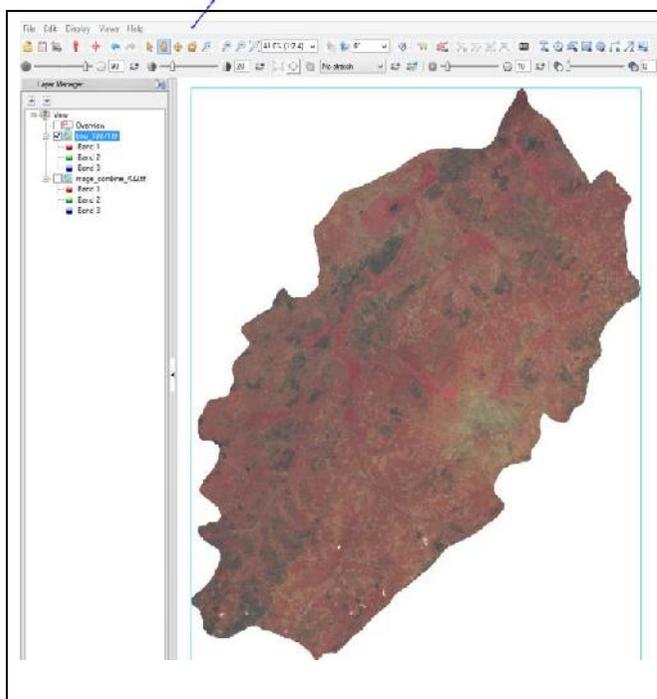


Figure 3 : Composition colorée 4-3-2 de l'image Landsat 7 ETM+ de 2002

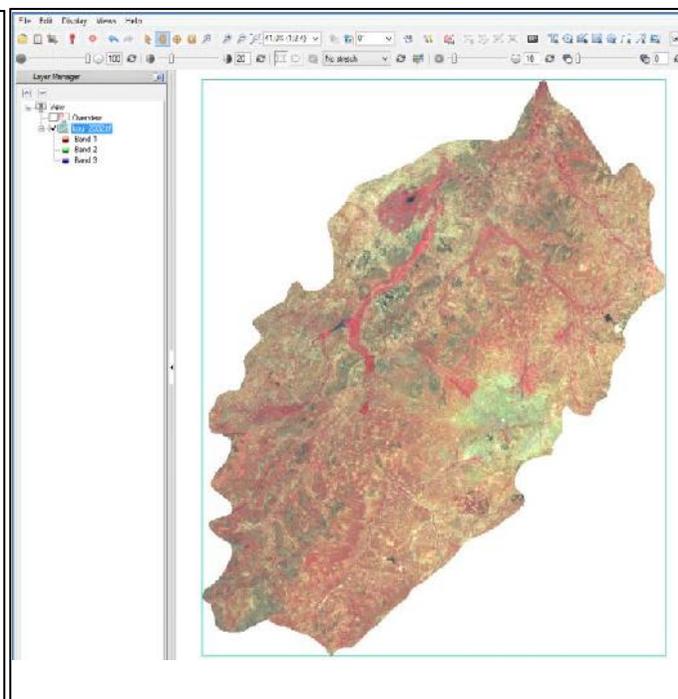
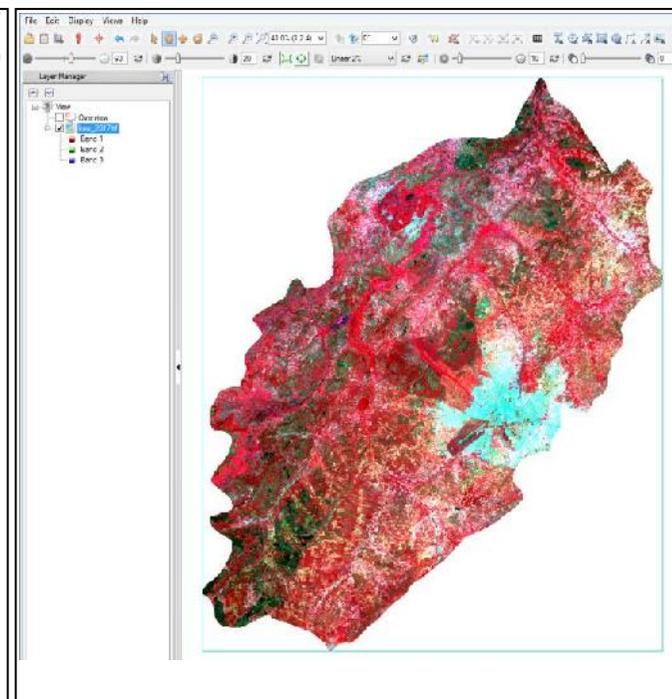


Figure 4 : Composition colorée 5-4-3 de l'image Landsat 8 OLI-TIRS 2017



Les compositions colorées fausses couleurs 4-3-2 et 5-4-3 permettent de montrer les formations végétales abondantes en rouge foncée (forêt galerie) ; les champs/jachère en rouge pâle – vert pâle, avec des contours bien marqués ; les Savanes arborées en rouge clair ; les savanes arbustive/herbeuse en mosaïque de couleur rouge-vert à vert ; les sols nus en blanc généralement en bordure des cours d'eau et les affleurements rocheux et les agglomérations en Cyan.

- **Amélioration de contraste**

Elle est pratiquement toujours appliquée avant d'analyser des images de télédétection. C'est une correction radiométrique qui consiste à rendre une image (composition colorée) plus interprétable/lisible par rapport à une image thématique donnée Toko I. (2014). Plusieurs techniques existent pour contraster une image. Pour cette étude l'égalisation d'histogramme est la méthode d'amélioration de contraste qui a été utilisée.

- **Traitements numériques**

- **Classification assistée par maximum de vraisemblance**

La classification d'image catégorise les pixels d'une image en classes, générant une représentation thématique. Elle s'effectue sur des images comportant un ou plusieurs canaux afin de séparer les zones selon leurs propres caractéristiques de diffusion ou spectrales. Les procédures de classification des images numériques sont de deux types, supervisées et non supervisées, pour cette étude le choix est porté sur la classification supervisée à cause de la connaissance du secteur d'étude. Dans ce cas, il faut choisir avant tout, des sites d'entraînement qui sont des regroupements homogènes de pixels caractéristiques d'une occupation du sol donnée. Sur les sites d'entraînement, le logiciel a classifié chaque image selon l'algorithme paramétrique qu'est le Maximum de vraisemblance. C'est un algorithme très couramment utilisé car, généralement le plus performant. Pour Wolff E. (2006), son utilisation suppose que les distributions des valeurs de réflectance des sites d'entraînement soient normales. Cet algorithme précise la distance de chaque pixel par rapport aux moyennes de classe et les affecte à la classe la plus proche. Si le pixel est plus éloigné que la distance définie par l'analyste pour n'importe quelle catégorie, il demeure non classé ou « inconnu ». L'avantage est que les classes obtenues ont une signification thématique précise et comme inconvénient le temps de réalisation est long en particulier pour le choix et la délimitation des sites d'entraînements. Pour obtenir une classification avec moins de confusion, il est recommandé de prendre un maximum d'aires d'entraînement par classe. Le nombre d'échantillons choisis dans le cadre de cette étude a été limité à 10 pour chaque classe. Les

classes qui ont été définies s'élèvent également à 10 (forêt galerie, forêt claire et savane boisée, savane arborée, savane arbustive, champs, culture irriguée, plantation forestière, sol nu, plan d'eau, agglomération)

- **Evaluation de la classification**

Une matrice de confusion a permis d'évaluer la qualité de la classification des images. Pour Lillesand T. et Kiefer R. (1994), une classification n'est pas complète sans l'évaluation de son exactitude. L'évaluation des résultats d'une classification se fait grâce à la comparaison de l'image classée avec des données de référence (photographies aériennes, cartes ou relevé de terrain). Ces zones d'évaluation seront relevées avec le même soin que les sites d'entraînement. On confrontera les valeurs de l'image classée à celles du terrain dans un tableau à double entrée appelé couramment matrice de contingence ou matrice de confusion. On reporte dans les cases du tableau, le nombre de zones selon leur appartenance aux différentes classes dans l'image classée (en ligne) et sur le terrain (en colonne). Les zones bien classées se localisent sur la diagonale de la matrice et les erreurs en dehors. On distingue deux types d'erreurs : les erreurs d'omission et de confusion (ou « commission » en anglais). Une erreur d'omission est une observation qui aurait dû être classée en B, mais qui a été 'oublié' et classée dans une autre classe. Une erreur de confusion est une observation qui est classée en B alors qu'elle aurait dû être classée dans une autre classe, il y a donc confusion (Wolff E. 2006).

Dans le cadre de notre étude les matrices de confusion de la classification de 1987, 2002 et 2017 ont été calculées dans Envi suivant les fonctions: /Classification/Post Classification/Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs.

- **Calcul des erreurs de commission et d'omission et des indices de pureté des classes, de validité cartographique, d'exactitude de la classification**

Les matrices de confusion ont permis de calculer les erreurs d'omission (EO), les erreurs de commission (EC), les indices de pureté des classes (IPC) et les indices de validité cartographique (IVC). Les erreurs d'omission (en colonne) ont été obtenues en faisant le rapport du nombre de pixels bien classés dans chaque unité d'occupation du sol et du nombre total de pixels de ladite unité. Tandis que les erreurs de commission (en ligne) ont été également obtenues par la même procédure, mais ici au niveau des lignes. Les indices de validité cartographique ont été obtenus en retranchant les erreurs d'omission de 100 %. Les indices de pureté des classes sont quant à eux obtenus, en retranchant les erreurs de commission de 100 %. L'indice d'exactitude (I) de la classification des images de ces trois

périodes a été calculé à partir des valeurs de chaque matrice de confusion, grâce à la formule suivante (Barima S. et *al.*, 2009 ; Mugisha S. et *al.*, 2010 ; Arouna O. 2012 ; Toko I. 2014) :

$$I = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{X}$$

Avec x_i : Nombre d'observations de la diagonale pour la classe i ;

X : Nombre total des observations pour l'ensemble des classes.

Si $I \geq 0,9$ (soit 90 %), alors l'interprétation est correcte (Mugisha S. et *al.*, 2010).

Pour cette étude, les résultats de cet indice obtenus sont respectivement de 90,39 % pour 1987; 88,21 % pour 2002 et 95.66 % pour 2017. Ceux-ci ont permis de valider les 3 classifications car la classification de 2002 est "proches" des 90% et celles de 1987 et 2017 sont au-delà.

- **Traitement post-classification**

Suite à la procédure de classification, il subsiste généralement un faible taux de pixels isolés, généralement mal classés ou non classés, souvent situés à la limite entre deux plages d'affectations distinctes. Ceux-ci donnent un aspect 'pointilliste' à l'image qui peut s'avérer gênant pour une représentation cartographique. Il est alors souhaitable d'homogénéiser la classification en réaffectant ces pixels à l'une ou l'autre classe. Pour ce faire, on utilise également des techniques de filtrage. Dans le cadre de notre étude le Filtre Médian majoritaire 3 x 3 a été appliqué à chaque image classifiée pour la généralisation de certains éléments qui avaient un aspect « sel et poivre ». Cette technique de filtrage consiste à affecter un pixel isolé à la classe dominante au sein de laquelle il se trouve.

▪ **Matrice de confusion des images landsat**

❖ **Matrice de confusion de l'image Landsat 5 TM de 1987 et calcul d'erreurs**

Le tableau 4 présente la matrice de confusion de l'image Landsat 5 TM de 1987

Tableau 4 : Matrice de confusion de l'image Landsat 5 TM de 1987 (pixel)

Données classifiées 1987	Données de référence 1987												
	FG	FCSB	SA	Sa	CP	CI	SN	PF	PE	AG	Total ligne	IPC (%)	EC (%)
FG	1260	128	0	0	0	31	0	0	0	0	1419	88.79	11.21
FCSB	8	4070	9	92	0	0	0	0	1	0	4180	97.37	2.63
SA	817	3114	12357	47	181	133	3	0	0	21	16652	74.11	25.89
Sa	5	234	109	8477	93	85	1	1	0	2	9005	94.13	5.87
CP	9	157	102	3	4994	29	10	1	0	134	5305	91.84	8.16
CI	0	159	0	0	1	9602	0	0	0	0	9762	98.16	1.84
SN	0	0	0	0	0	0	393		0	3	393	99.24	0.76
PF	0	0	0	0	0	0	1	458	0	0	459	99.16	0.84
PE	0	132	0	0	0	21	0	0	1344	0	1497	89.78	10.22
AG	0	1	0	5	25	1	7	0	0	13335	13374	99.71	0.29
Total	2099	7995	12577	8624	5294	9902	415	459	1345	13495	62205		
IVC (%)	60.03	50.78	98.25	98.3	94.33	96.97	94.93	99.5	99.93	98.81			
EO (%)	39.97	49.22	1.75	1.7	5.67	3.03	5.07	0.5	0.07	1.19			

Légende : **FG** : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération ; **IPC** : Indice de pureté des classes ; **EC** : Erreur de commission ; **IVC** : Indice de validité cartographique ; **EO** : Erreur d'omission

En 1987, les valeurs élevées de l'Indice de Pureté des Classes (IPC) au niveau des différentes classes d'occupation du sol FG (88.79 %) ; FCSB (97.37 %) ; Sa (94.13%) ; CP (91.84%) ; CI (98.16%) ; SN (99.24%) ; PF (99.16%) ; PE (89.78%) ; AG (99.71) et de celles de l'Indice de Validité cartographique de ces mêmes classes FG (60.03 %) ; FCSB (50.78 %) ; Sa (98.3%) ; CP (94.33%) ; CI (96.97%) ; SN (94.93%) ; PF (99.5%) ; PE (99.93%) ; AG (98.81%) ; indiquent qu'une bonne partie des classes d'occupation du sol a été bien identifiée.

❖ **Matrice de confusion de l'image Landsat 7 ETM + de 2002 et calcul d'erreurs**

Le tableau 5 présente la matrice de confusion de l'image Landsat 7 ETM+ de 2002

Tableau 5 : Matrice de confusion de l'image Landsat 7 ETM+ de 2002 (pixel)

	<i>Données de référence 2002</i>												
<i>Données classifiées 2002</i>	FG	FCSB	SA	Sa	CP	CI	SN	PF	PE	AG	Total ligne	IPC (%)	EC (%)
FG	3212	191	6	40	0	232	8	1	66	0	3756	83.55	16.45
FCSB	202	8400	344	199	307	3	0	0	15	0	9470	88.7	11.3
SA	121	1630	12297	1799	1807	35	23	0	6	55	17718	69.19	30.81
Sa	40	292	686	23832	155	274	12	0	1	284	25292	93.18	6.82
CP	8	254	77	92	15580	15	258	2	0	164	16286	94.72	5.28
CI	163	13	73	157	19	10087	0	0	140	0	10652	94.7	5.3
SN	0	0	0	31	529	0	3036	0	0	268	3596	78.57	21.43
PF	0	0	1	0	0	0	0	550	458	0	1009	98.5	1.5
PE	25	0	0	0	0	0	0	0	1225	0	1250	98	2
AG	0	3	42	350	656	2	418	0	0	16591	1471	91.86	8.14
Total	3771	10783	13526	26500	19053	10648	3755	553	1911	17362	89029		
IPC (%)	85.18	77.9	90.92	89.93	81.77	94.73	80.85	97	84.31	95.56			
EO (%)	14.82	22.1	9.08	10.07	18.23	5.27	19.15	3	15.69	4.44			

Légende : **FG** : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Champs ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération ; **IPC** : Indice de pureté des classes ; **EC** : Erreur de commission ; **IVC** : Indice de validité cartographique ; **EO** : Erreur d'omission

En 2002, les valeurs élevées de l'Indice de Pureté des Classes (IPC) au niveau des différentes classes d'occupation du sol FG (83.55 %) ; FCSB (88.7 %) ; Sa (93.18%) ; CP (94.72%) ; CI (94.7%) ; PF (98.5%) ; PE (98%) ; AG (91.86%) et de celles de l'Indice de Validité cartographique de ces mêmes classes FG (85.18 %) ; FCSB (77.9 %) ; Sa (89.93%) ; CP (81.77%) ; CI (94.73%) ; SN (80.85%) ; PF (97%) ; PE (84.31%) ; AG (95.56%) ; indiquent également que la majorité des classes d'occupation du sol a été bien identifiée.

❖ Matrice de confusion de l'image Landsat 8 OLI – TIRS de 2017 et calcul d'erreurs

Le tableau 6 présente la matrice de confusion de l'image Landsat 8 OLI – TIRS de 2017

Tableau 6 : Matrice de confusion de l'image Landsat 8 OLI – TIRS de 2017 (pixel)

	<i>Données de référence 2017</i>												
<i>Données classifiées 2017</i>	FG	FCSB	SA	Sa	CP	CI	SN	PF	PE	AG	Total ligne	IPC (%)	EC (%)
FG	297	0	0	0	0	142	0	0	0	0	439	67.65	32.35
FCSB	4	1255	552	0	0	0	0	0	0	0	1811	69.3	30.7
SA	1	0	388	0	0	11	0	0	0	0	400	97	3
Sa	0	3	11	872	0	0	2	8	0	0	896	98.2	1.8
CP	1	0	2	1	197	0	4	0	1	4	206	93.81	6.19
CI	2	0	0	0	0	4624	0	25	28	0	4679	99.36	0.64
SN	0	0	0	57	12	0	596	0	0	0	665	89.62	10.38
PF	0	0	0	0	0	0	0	685	0	0	685	97	3
PE	0	0	0	0	0	0	0	0	1092	0	1092	100	0
AG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9169	9169	100	0
Total	305	1258	953	930	209	4777	602	718	1121	4	20042		
IPC (%)	97.38	99.76	40.71	93.76	94.26	96.8	99	95	97.41	99.96			
EO (%)	2.62	0.24	59.29	6.24	5.74	3.2	1	5	2.59	0.04			

Légende : **FG** : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Champs ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération ; **IPC** : Indice de pureté des classes ; **EC** : Erreur de commission ; **IVC** : Indice de validité cartographique ; **EO** : Erreur d'omission

La matrice de confusion de 2017 montre que les valeurs élevées de l'Indice de Pureté des Classes (IPC) au niveau des différentes classes d'occupation du sol SA (97 %) ; Sa (98.2%) ; CP (93.81%) ; CI (99.36%) ; SN (89.62%) ; PF (97%) ; PE (100%) ; AG (100%) et de celles de l'Indice de Validité cartographique de ces mêmes classes Sa (93.76%) ; CP (94.26%) ; CI (96.8%) ; SN (99%) ; PF (95%) ; PE (97.41%) ; AG (99.96%) ont été très bien classés.

1.2.4.7.2. Calcul des taux moyens annuels d'expansion spatiale (T)

Ce taux a été calculé grâce à la formule de Bernier (1992) à partir de la superficie des unités d'occupation du sol. Il exprime la proportion de chaque unité d'occupation du sol qui change annuellement.

$$T = [(\ln S_2 - \ln S_1) / ((t_2 - t_1) \times \ln e)] \times 100$$

Avec S_1 et S_2 : Superficie d'une unité paysagère à la date t_1 et t_2 respectivement ;

$t_2 - t_1$: Nombre d'années d'évolution ;

\ln : Logarithme népérien ;

e : Base du logarithme népérien ($e = 2,71828$)

1.2.4.7.3. Détection des changements des unités d'occupation du sol

- **Matrice de transition**

La matrice de transition est un tableau à double entrées qui permet de mettre en évidence les changements d'état des unités d'occupation du sol entre deux dates instantanées (Pontius G. 2000). Elle est constituée de x lignes et de y colonnes. Le nombre x de lignes de la matrice indique le nombre d'unités paysagères présentes à la date t_1 tandis que le nombre y de colonnes de la matrice indique le nombre d'unités paysagères converties à la date t_2 . La diagonale quant à elle contient les superficies des unités paysagères restées inchangées (Toko

I. 2014). Les transformations se font des lignes vers les colonnes. Les superficies de ces différentes classes d'unités paysagères ont été calculées à partir du croisement des cartes de deux dates.

Pour cette étude, les matrices de transition ont été utilisées pour représenter la quantité des unités qui ont changé de classe ou non, entre 1987 et 2002 et entre 2002 et 2017.

- **Calcul du taux de conversion des unités d'occupation du sol**

Pour mesurer le taux de conversion d'une unité en d'autres unités d'occupation du sol, le taux de conversion a été utilisé. Il est obtenu à partir de la matrice de transition (Arouna O. 2012 ; Toko I. 2014) suivant la formule ci-dessous :

$$Tc = [(S_{it} - S_{is}) / S_{it}] \times 100$$

Avec:

Sit : Superficie de l'unité d'occupation du sol i à la date initiale t ;

Sis : Superficie de la même catégorie de cette unité i demeurée stable à la date t1

1.2.4.7.4. Analyse de l'intensité des changements

Les programmes d'analyse "PontiusMatrix22" et "Intensity Analysis02.xlms" de Aldwaik et Pontius (2012) ont permis de mesurer en (%) les intensités des changements selon les intervalles de temps, les unités d'occupation du sol et les transitions entre unités d'occupation du sol.

- **PontiusMatrix22**

Ce programme fournit une variété d'analyses et les sommaires statistiques d'une matrice de tableau-croisé (www.clarku.edu/~rpontius).

En se basant sur les matrices de transition de 1987 - 2002 et de 2002 - 2017, le programme a généré quatre graphiques montrant lesdites intensités selon les intervalles de temps 1987 – 2002 et 2002 - 2017. Le premier et le deuxième graphique présentent les intensités des changements survenus au sein de chaque catégorie. Tandis que le troisième et le quatrième graphique présentent les intensités de pertes et de gains par catégorie. A ces niveaux, l'état de rapidité des changements est déterminé grâce à la ligne verticale en tireté bleue, appelée ligne de zone uniforme. Si le graphe est à gauche de cette ligne, le changement est lent ou dormant. Mais si celui-ci est à droite de cette ligne, le changement est rapide ou actif.

➤ **Intensity Analysis02.xlms**

Grâce aux matrices de transition le programme a permis de générer des statistiques pour les transitions selon les intervalles de temps, entre chaque catégorie d'occupation du sol et les autres. Il en est de même pour les pertes et gains survenus lors des transitions entre unités.

1.2.4.7.5. Projection de la dynamique d'occupation des sols à l'horizon 2030

La projection de la dynamique d'occupation des sols a porté sur l'estimation de ce dernier à l'horizon 2030. Pour ce faire l'outil de modélisation Land Change Modeler (LCM) développé par le laboratoire Clarks Labs de l'université de Clark aux Etats Unis a été utilisé. Il a été construit dans le cadre des activités menées par le laboratoire pendant plusieurs années concernant la préservation de l'environnement au niveau mondial. C'est un outil qui est donc orienté spécifiquement vers des objectifs de préservation des habitats, de la biodiversité et partant, des écosystèmes (Kaboré O. 2013). De ce point de vue, il permet l'analyse des changements dans l'occupation et l'utilisation des terres ainsi que leur modélisation. Dans le cadre de cette étude l'outil LCM sous Idrisi a été utilisé. Les projections sur l'horizon 2030 se sont effectuées à partir de la transition observée entre 1987 ; 2002 et 2017. Cette période est considérée comme année de calage du modèle.

1.2.4.8. Approche cartographique de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique

L'étude de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou est basée sur l'analyse des différents facteurs. Quatre facteurs principaux (Wischmeier et Smith, 1978) ont été considérés : l'érosivité des pluies ou agressivité des gouttes de pluies ; l'érodibilité des sols ; l'occupation du sol ; la pente topographique. Ce choix est fait en s'appuyant sur des études relatives à l'érosion des sols (Roose E. *et al.*, 1996; Talbi O. *et al.*, 2002 ; Mazour M. 2004; Morsli B. *et al.*, 2004 ; Boughalem M. *et al.*, 2013 ; Ouédraogo B. *et al.*, 2019). Ces mêmes auteurs s'accordent pour considérer ces facteurs déclenchant de l'érosion, comme étant les plus pertinents et les plus discriminants.

1.2.4.8.1. Cartographie du facteur érosivité de la pluie

La pluie est un agent essentiel de l'érosion hydrique. L'érosivité de la pluie peut être définie comme son aptitude à provoquer l'érosion. Elle dépend surtout de l'intensité de pluie ou de l'énergie cinétique qui en résulte directement (Stengel P. et Gelin S. 1998). Plus grandes sont

l'intensité et la durée d'un épisode de pluie, plus grand est le risque d'érosion. L'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol peut briser les agrégats et disperser les particules de sol. Les particules les plus légères, dont les particules très fines de sable, de limon, d'argile et de matière organique, sont facilement emportées par les éclaboussures d'eau de pluie et les eaux de ruissellement. Il faut davantage d'énergie transmise par les gouttes de pluie et un écoulement plus important pour emporter les particules plus grossières de sable et de gravier. L'estimation du facteur R nécessite des enregistrements de précipitations à des résolutions élevées et aux pas de temps réduits. À défaut de disponibilité de données nécessaires pour le calcul du facteur R par la méthode directe, d'autres auteurs ont développé plusieurs protocoles statistiques qui se focalisent sur les précipitations journalières, mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R. C'est le cas de la formule de Renard G. et Freimund R. (1994) utilisée dans le cadre de cette étude pour l'estimation de l'érosivité de la pluie dans le bassin versant. Le choix de cette équation se justifie par la disponibilité des données pluviométriques annuelles sur l'ensemble des stations météorologiques du bassin. Ainsi R se traduit par l'équation :

$P < 850 \text{ mm}$ alors, $R = 0,0483P^{1,610}$

$P > 850 \text{ mm}$ alors, $R = 587,8 - 1,219P + 0,004105P^2$

Avec P, la précipitation annuelle en mm

L'équation de Renard G. et Freimund R (1994) a permis de réaliser la carte d'érosivité du sol aux précipitations. Cela a été possible à partir des valeurs relevées sur l'ensemble des stations pluviométriques du bassin et de ses environs immédiats. Quatre niveaux d'érosivité ont été délimités dans le bassin versant.

1.2.4.8.2. Cartographie du facteur érodibilité des sols

L'érodibilité d'un sol est une estimation, fondée sur les caractéristiques physiques du sol, de la vulnérabilité de ce sol à l'érosion. Elle est fonction de la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau (Roose E. et Sarrailh J-M. 1990). L'érodibilité est surtout influencée par la texture du sol, mais elle l'est également par sa structure, sa teneur en matière organique et sa perméabilité. Bolline A. et Rosseau P. (1978) ont proposé une classification des sols selon leur érodibilité.

Tableau 7 : Classification de l'érosion en fonction de l'érodibilité

Erodibilité	Nature du sol
K < 0,10	Sols très résistants à l'érosion
0,10 < K < 0,25	Sols assez résistants à l'érosion
0,25 < K < 0,35	Sols moyennement sensible à l'érosion
0,35 < K < 0,45	Sols assez sensibles à l'érosion
K > 0,45	Sols très sensibles à l'érosion

Source : Bolline A. et Rosseau P. (1978)

En générale, les sols qui affichent une plus grande résistance à l'érosion sont ceux dans lesquels l'eau s'infiltré plus rapidement, ceux qui sont riches en matière organique et ceux dont la structure est améliorée. Dans le cadre de cette étude le calcul de l'érodibilité K a été effectué à partir de Renard G. et *al.*, (1997)

$$K = 2.8 \times 10^{-7} \times M^{1.14} (12.Mo) + 4.3 \times 10.3 (b-2) + 3.3 \times 10^{-3} (c-3).$$

Avec, Mo = Matières organiques

B = indice de structure du sol

C = perméabilité du sol

M = (% limons + % sables) (100 - % argiles).

1.2.4.8.3. Cartographie du facteur LS

Le critère de pente est utilisé pour mettre en évidence la capacité du ruissellement à détacher et transporter des particules de sol : plus la pente est importante, plus le ruissellement érodera le sol. Fournier (1967) affirmait qu'il suffit d'une action pluviale pour déclencher le phénomène de l'érosion, puisque cette dernière apparaît sur des pentes très faible, de l'ordre de 2%. Plus la pente est forte et plus elle est longue, plus l'érosion est plus intense.

Le facteur LS est évalué à partir de deux critères : l'inclinaison de la pente et sa longueur, qui sont calculés à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). Dans le cadre de cette étude l'équation de Bizuwerk et *al.* (2008) a été utilisé avec le logiciel Arc gis. En effet, la longueur de la pente et l'inclinaison de la pente peuvent être utilisés dans un index unique, pour

exprimer le rapport entre la perte de sol tel que défini par Wischmeier et Smith (1978).
Comme indiqué ci-dessous :

$$LS = (x/22.1)^m(0.065+0.045S+0.005S^2)$$

Avec:

X = longueur de la pente (m) ;

S = Gradient de la pente (%).

Pour calculer la valeur X, l'accumulation de débit a été dérivée à partir du MNT après avoir mené des processus de direction et de remplissage de débit dans Arc gis.

$$X = (\text{accumulation de débit} \times \text{résolutions})$$

En substituant la valeur X, l'équation LS sera :

$$LS = (\text{accumulation de débit} \times \text{résolution}/22.1)^m (0.065+0.045S+0.0065S^2)$$

Le gradient de la pente (%) est extrait du MNT en utilisant le logiciel Arc gis. Et la valeur de (m) a été obtenue du tableau suivant :

Tableau 8: Valeur de m pour le facteur LS,

Valeur de m	Pente %
0.5	>5
0.4	3-5
0.3	1-3
0.2	<1

Source : Wischmeier et Smith (1978)

1.2.4.8.4. Cartographie du facteur occupation des sols (C)

Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'est pas suffisamment protégé par le couvert végétal et/ou une couche de résidus de culture. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et des éclaboussures d'eau. Ils ont aussi tendance à réduire la vitesse d'écoulement de l'eau et à favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol (Payet E. et *al.*,

2011). Le facteur C est défini comme le rapport entre les pertes en sols nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sols correspondants aux sols sous système d'exploitation (Wischmeier H. et Smith D. 1978 ; El Garouani A. *et al.*, 2008). On confond dans le même facteur C, à la fois le couvert végétal, son niveau de production et les techniques culturales. C varie de 1 sur sol nu, soit sa valeur maximale en termes d'efficacité des processus érosifs, à 1/1000ième sous forêt, 1/100ième sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10ième sous cultures sarclées (Payet E. *et al.*, 2011).

1.2.4.8.5. Combinaison des facteurs : Cartographie de la vulnérabilité à l'érosion

La méthodologie utilisée est le croisement de paramètres sous forme de combinaison logique (Bou Kheir *et al.*, 2001 ; N'Dri *et al.*, 2008) dans un Système d'Information Géographique (SIG). Pour cette cartographie, des facteurs ont été considérés comme étant de même importance, en l'occurrence de l'érosion, afin d'aboutir à la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols du bassin versant (Tableau 9).

Tableau 9: Classification des facteurs de vulnérabilité des terres à l'érosion hydrique dans le bassin versant du kou

Facteur d'érosion	Vulnérabilité à l'érosion hydrique	code
Erodibilité des sols K	Faible	1000
	Moyen	2000
	Forte	3000
Longueur et inclinaison de la pente LS	Faible	100
	Moyen	200
	Forte	300
Occupation des sols C	Faible	10
	Moyen	20
	Forte	30
Erosivité R	Faible	1
	Moyen	2
	Forte	3

Source : Adapté de Y. LE Bissonnais *et al.*, 2002

À ce stade de réalisation de la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique, les facteurs : érodibilité des sols, pente des terres, occupation des sols et l'érosivité des pluies ont

été combinés. Pour réussir cette opération, des codes ont été assignés aux différents facteurs par classes (tableau 9) en se référant à la classification de Aké *et al.*, (2012). Par ordre de vulnérabilité croissante à l'érosion suivant chaque facteur par classification, ils sont de 1000, 2000 et 3000 pour le cas de l'érodibilité du sol, de 100, 200 et 300 pour l'inclinaison de la pente, de 10, 20 et 30 dans le cas de l'occupation du sol et de 1, 2 et 3 pour l'agressivité des pluies. Après combinaison, la distinction est ainsi facilitée, car la saisie s'est effectuée aisément, telle que la classe "3123", par exemple, provient du croisement des classes "3000", "100", "20" et "3". Ce qui a permis d'obtenir des classes de combinaison. Les quatre facteurs considérés n'étant pas hiérarchisés, la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion du bassin versant du kou a été évaluée en sommant les quatre chiffres constitutifs du code représentatif. Ainsi, pour la classe "3123", l'indice est de 9 (3+1+2+3). Au total, trois classes de vulnérabilité sont déterminées : faible (indices 4 à 6), moyenne (indices 7 à 10) et forte (indices 11 à 12).

Tableau 10 : Classification des combinaisons possibles par indices de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique dans le bassin versant du kou.

	Combinaison des codes des facteurs	Vulnérabilité à l'érosion hydrique	Indice
Vulnérabilité multifactorielle	1111 ; 1112 ; 1122 ; 1221 ; 1211 ; 1212 ; 2211 ; 2111 ; 2112	Faible	4 à 6
	2222 ; 2223 ; 1222 ; 2322 ; 3222 ; 2221 ; 3223 ; 3311 ; 2122 ; 3123	Moyenne	7 à 9
	2233 ; 3333 ; 3233 ; 3323 ; 3322 ; 3332 ; 2333 ; 2332	Forte	10 à 12

Source : Adapté de Y. LE Bissonnais *et al.*, 2002.

1.2.4.8.6. Validation de la carte de vulnérabilité à l'érosion

Afin de valider la carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique, diverses méthodes sont utilisées pour valider ce type d'approche, on peut citer à titre d'exemple les mesures d'accumulation des sédiments dans une retenue, les mesures par traceurs radio actifs et susceptibilité magnétique des sédiments (Ait Fora A. 1995) ou encore une confrontation directe avec la réalité de terrain selon des critères visuels adaptés (Bou R. 2001). Dans cette perspective, nous avons adopté cette dernière technique combiné au teste statistique. Faute de travail expérimental difficile à réaliser sur terrain en raison de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques sur de grandes étendues du bassin.

L'analyse bibliographique sur la problématique de la caractérisation des processus érosifs ont permis de donner une orientation à cette étude. Le cadre théorique de l'étude a permis d'adopter des méthodes appropriées de collectes des données, de traitement et d'analyse des résultats. Diverses méthodes ont été utilisées pour comprendre la vulnérabilité des sols à l'érosion. Il s'agit de méthodes d'analyses statistiques, descriptives et cartographiques. Ce cadrage méthodologique permet d'atteindre les objectifs de recherche et de vérifier les hypothèses de travail.

CHAPITRE 2 :

CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE

Ce chapitre présente le bassin versant du Kou à travers les fondements physiques et humains. Les aspects biophysiques prennent en compte les facteurs climatiques, pédologiques, géologiques et morphologiques, la topographie, le réseau hydrographique, les formations végétales et les ressources pastorales et foncières. Les aspects humains abordent les groupes socio-culturels, les données démographiques et économiques, les formes d'organisation sociale et du système d'accès à la terre. Ces deux aspects sont nécessaires pour la compréhension des facteurs de l'érosion hydrique dans le bassin versant.

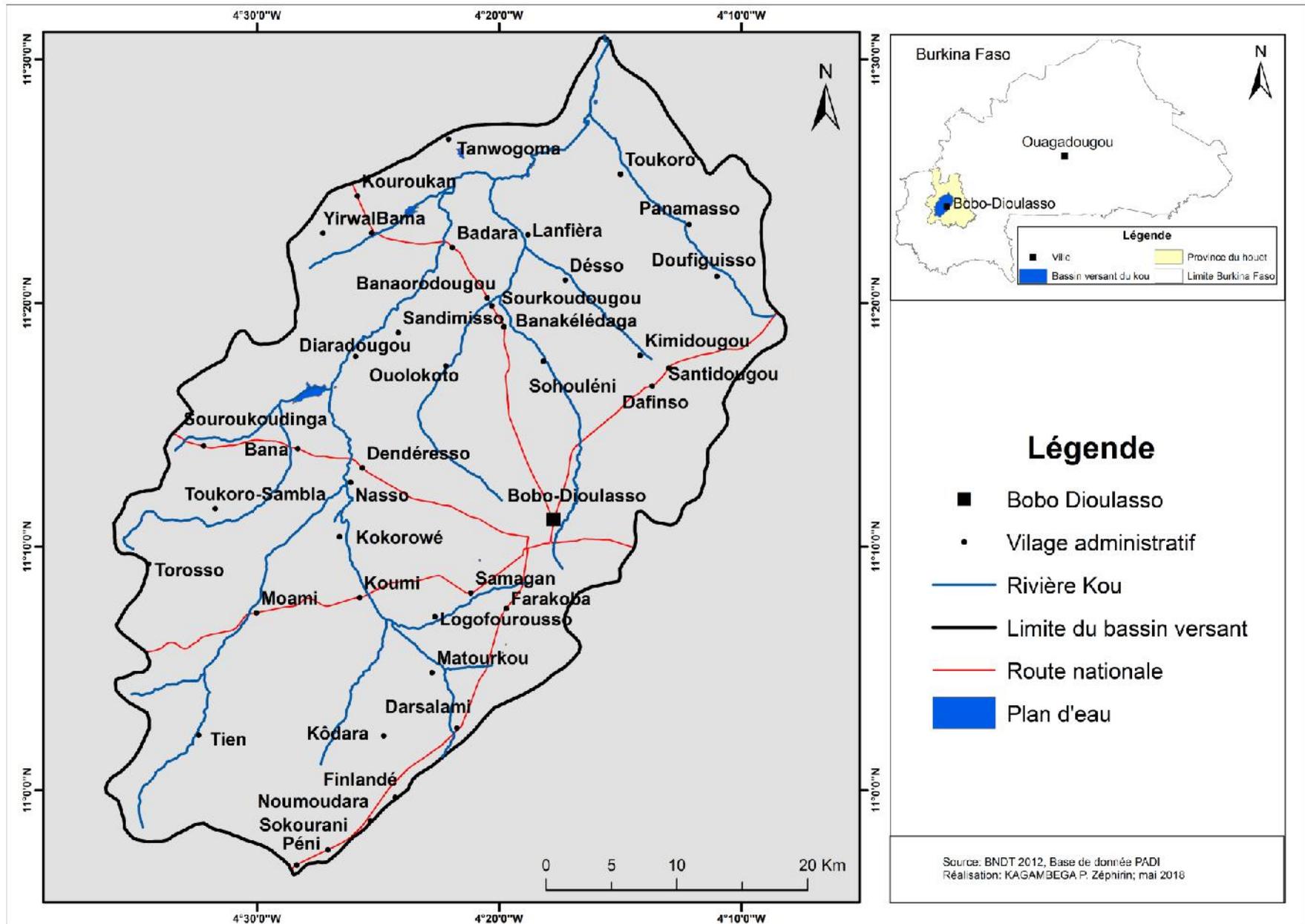
2.1. Caractéristiques physiques de la zone d'étude

Les caractéristiques physiques sont abordées à travers les différents paramètres qui conditionnent la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou

2.1.1. Situation géographique du bassin versant du Kou

Le bassin versant du Kou (carte 4) est situé à l'Ouest du Burkina Faso dans la région des Hauts Bassins. Il est à cheval sur trois communes à savoir les communes de Bama, Bobo-Dioulasso et de Péni. Ce bassin est l'espace géographique qui draine la rivière Kou et abrite l'agglomération urbaine de Bobo Dioulasso. D'une superficie de 1823 km², il est situé entre les longitudes 4° 08' W et 4° 36' W et les latitudes 10° 52' N et 11° 32' N.

Carte 4 : Localisation de la zone d'étude



2.1.2. Caractéristiques climatiques

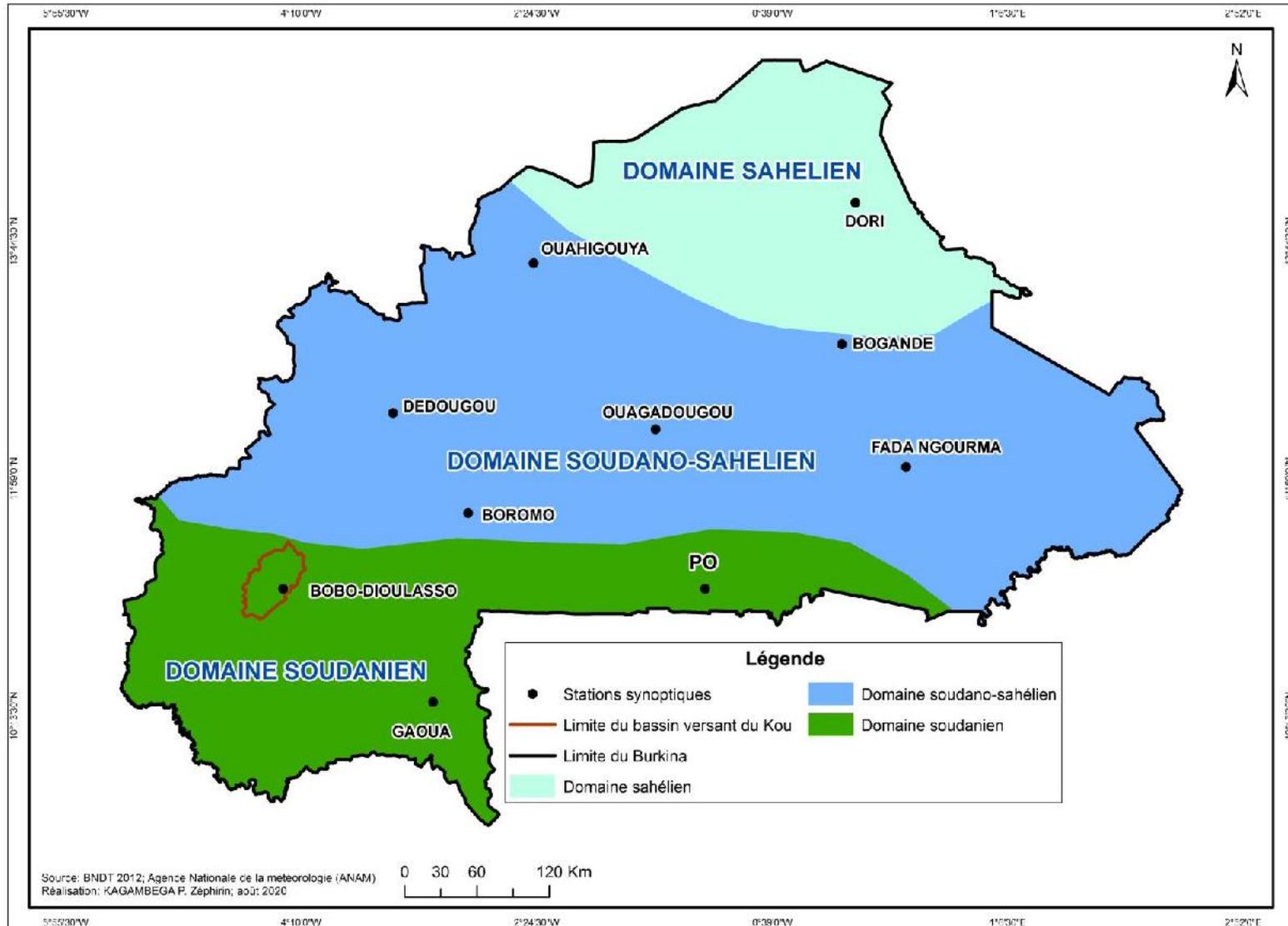
Le climat à travers les précipitations a une grande influence sur l'érosion hydrique des sols. Plus grandes sont l'intensité et la durée d'un épisode de pluie, plus grand est le risque d'érosion. Cependant, même si l'érosion causée par des averses de longue durée et de moindre intensité n'est habituellement pas aussi spectaculaire ni manifeste que celle qui est produite par les gros orages, elle peut néanmoins à la longue entraîner des pertes de sol significatives.

L'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol peut briser les agrégats et disperser les particules de sol. Les particules les plus légères, dont les particules très fines de sable, de limon, d'argile et de matière organique, sont facilement emportées par les éclaboussures d'eau de pluie et les eaux de ruissellement. Il faut davantage d'énergie transmise par les gouttes de pluie et un écoulement plus important pour emporter les particules plus grossières de sable et de gravier.

En effet, le Burkina Faso situé dans la zone intertropicale est caractérisé par l'alternance de deux saisons, à savoir une saison pluvieuse (4 à 5 mois) qui s'étend de juin à octobre et une saison sèche (7 à 8 mois) qui s'étend d'octobre à mai. L'alternance de ces saisons est conditionnée par le déplacement annuel du Front Intertropical (FIT). Le pays compte trois domaines climatiques qui sont :

- le domaine sahélien au nord du pays avec des précipitations inférieures à 600 mm/an,
- le domaine soudanien au sud du pays qui contient le bassin du Kou avec des précipitations de plus de 900 mm/an,
- le domaine soudano-sahélien est situé entre les deux zones décrites ci-dessus. Les précipitations dans cette zone varient entre 600 et 900 mm/an.

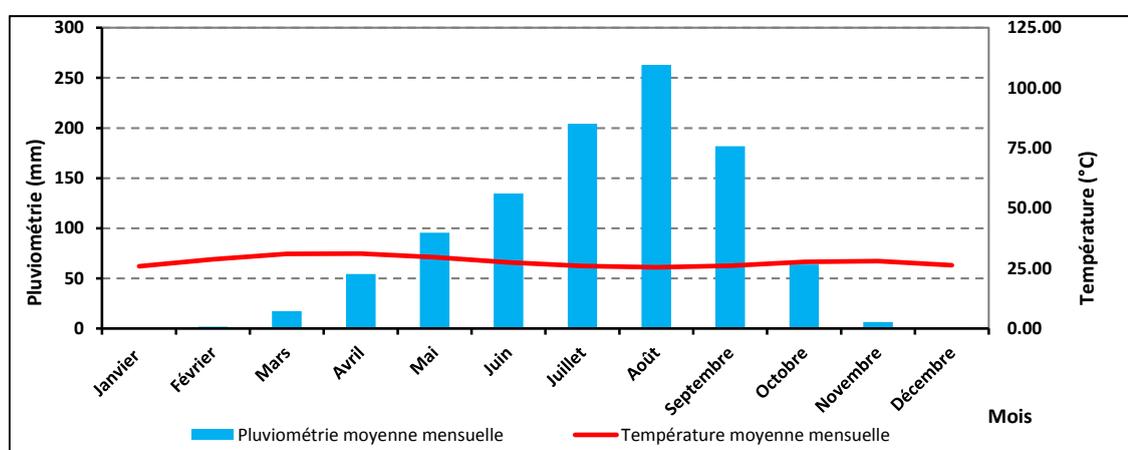
Carte 5 : Domaines climatiques du Burkina Faso



Le bassin du Kou est situé dans le domaine soudanien du Burkina Faso où la pluie annuelle varie entre 900 et 1200 mm. La saison pluvieuse y dure généralement 5 mois, de mai à septembre. Le mois d'août est le mois le plus pluvieux et enregistre en moyenne 275 mm de pluie.

Les températures moyennes mensuelles varient entre 25 °C et 31 °C. Les mois les plus froids sont les mois de décembre et janvier et les mois les plus chauds sont les mois de mars et avril. L'évapotranspiration potentielle est maximale durant le mois de mars (202 mm) et minimale durant le mois d'août (116 mm).

Figure 5 : Diagramme pluviothermique de 1998 à 2018 de la station synoptique de Bobo-Dioulasso

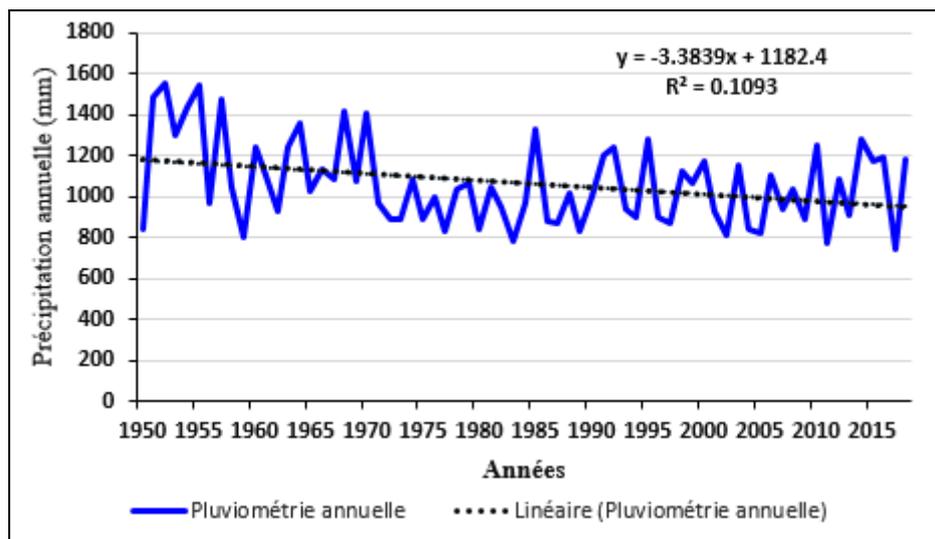


Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

2.1.2.1. Variations interannuelles des précipitations dans le bassin versant du Kou

L'analyse de la variabilité interannuelle des pluies dans le bassin versant du Kou porte sur la période 1950 – 2018. Il s'agit de décrire l'évolution interannuelle des pluies moyennes dans le bassin et de déterminer les modalités temporelles, notamment la détermination de la tendance et d'éventuelles ruptures de stationnarité sur l'ensemble du bassin. La figure 6 traduit la variabilité interannuelle de la pluie dans le bassin versant du Kou.

Figure 6 : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Bobo-Dioulasso



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

La figure 6 a permis de montrer un non stationnarité de l'évolution pluviométrique de 1950 à 2018. En effet, l'année 1955 a été la plus pluvieuse avec un cumul pluviométrique supérieur à 1500 mm contrairement aux années 1983, 2011 et 2017 qui enregistrent une hauteur de pluies avoisinant les 700 mm (ANAM, 2018). Cependant, depuis 1990, on constate une légère augmentation des quantités de pluies. Cette augmentation est qualifiée de « reprise pluviométrique » par Hountondji *et al.* (2005).

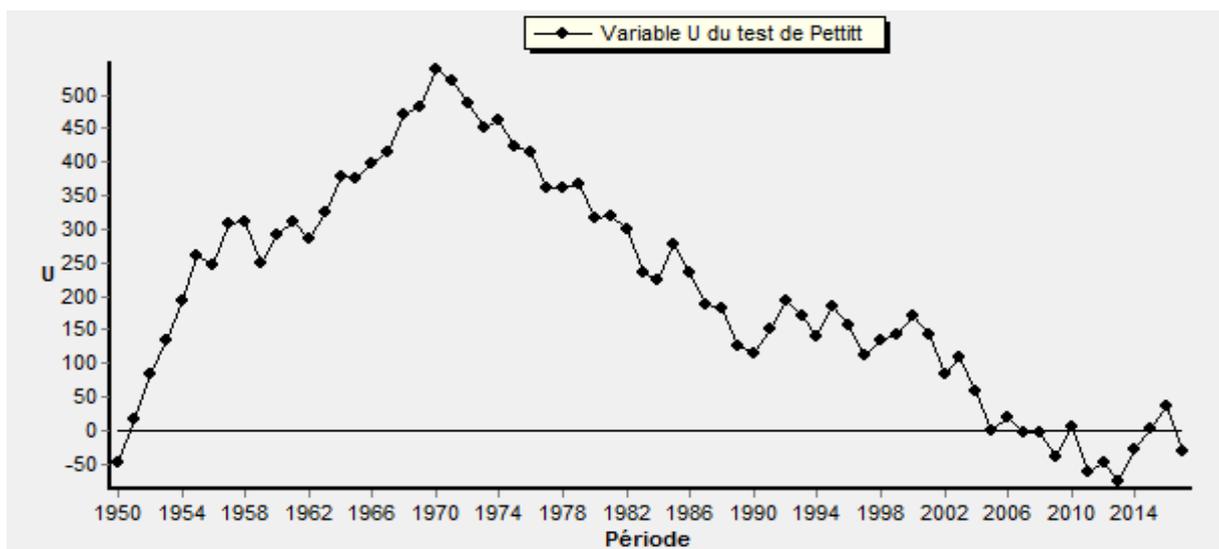
La droite de tendance indique une tendance baisse de la pluviométrie. Le coefficient directeur de l'équation de la droite de tendance est négatif (-3,3838), traduisant ainsi une régression de la pluviométrie. La faible valeur du R^2 (0,1093) témoigne d'une forte dispersion des nuages de point autour de la droite de régression. Cette statistique confirme l'importance de la variation temporelle de la pluviométrie.

Cette variabilité pluviométrique observée dans le bassin versant est conforme à ce qui a été observé dans la plus part des études sur le régime des précipitations en Afrique de l'Ouest (Hubert P. *et al.*, 1989 ; Paturel E. *et al.*, 2002 ; Hountondji C. *et al.* 2005 ; Conway D. *et al.*, 2009 ; Mahé G. *et Paturel P.* 2009) et particulièrement au Burkina Faso (Traoré, F. 2012 ; Yanogo I. 2012 ; Tirogo Y. 2016).

2.1.2.2. Analyse de rupture de stationnarité dans le bassin versant du Kou

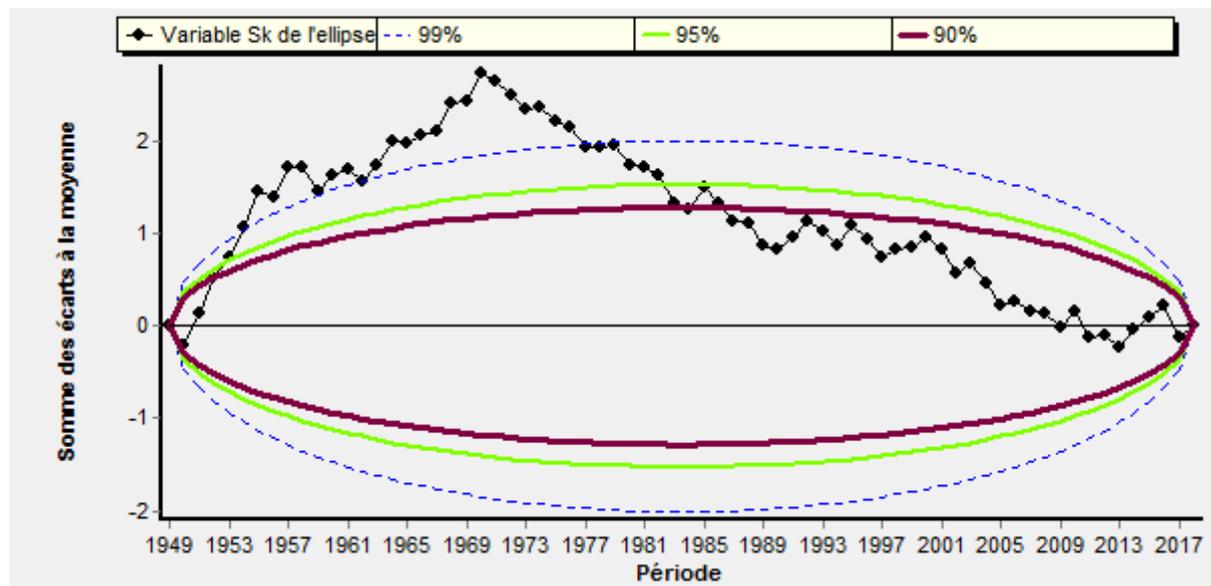
La rupture a été déterminée à partir des données pluviométriques de la station synoptique de Bobo Dioulasso. Plusieurs approches permettent de mettre en évidence les ruptures. Parmi les procédures statistiques souvent utilisées dans des études des séries hydrométéorologiques, deux sont mises en œuvre dans la présente étude, le test de Pettitt et la procédure de segmentation de Hubert. Elles ont été largement utilisées pour l'étude de la stationnarité de séries chronologiques (Hubert P. et Carbonnel J. 1989 ; Koumassi H. 2014 ; Tirogo Y. 2016). Ils sont plus robustes et communément utilisés Pettitt (1979) et (Hubert P. et *al.*; 1998). Ces deux approches permettent de déterminer d'éventuels points de changement. Les figures 7 et 8 montrent le test de Pettitt et de buishand appliqué aux séries pluviométriques annuelles (1950 - 2018) dans le bassin versant du Kou.

Figure 7 : Rupture de stationnarité par le test de Pettitt dans les séries pluviométriques du bassin versant



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 8 : Rupture de stationnarité par le test Buishand dans les séries pluviométriques du bassin versant



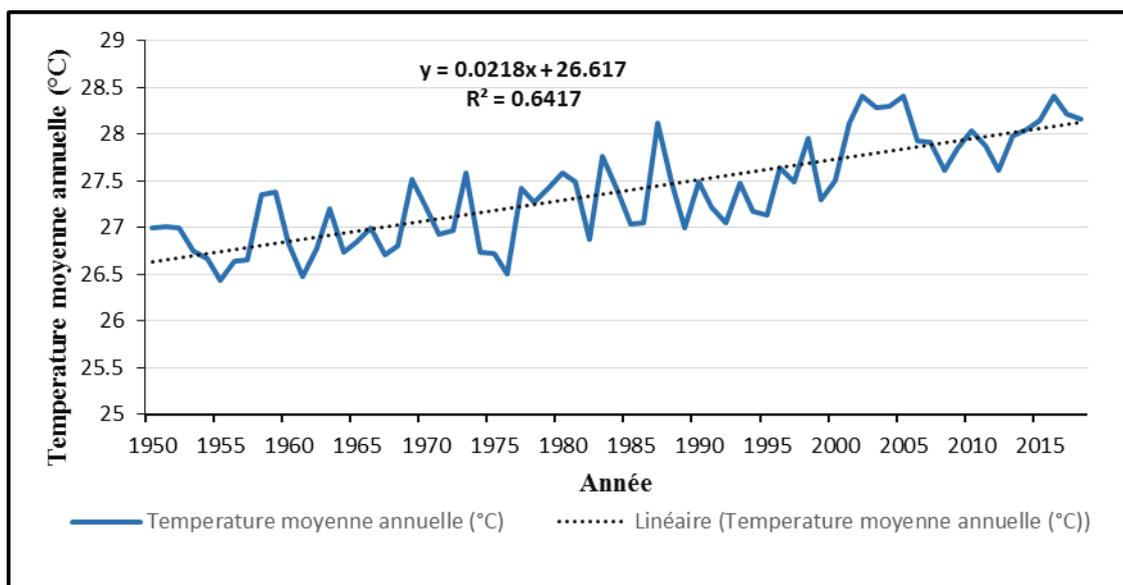
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Il ressort de l'analyse des figures ci-dessous qu'une rupture a été observée en 1970 dans la série pluviométrique utilisée avec une significativité de 90 % selon le test de Pettitt complété par le test de buishand. La statistique de coupure atteint son maximum en 1971. Ces résultats confirment la rupture de stationnarité des années 1970, 1971 soulignée par de nombreux auteurs en Afrique de l'ouest (Houndenou C. 1999 ; Vissin W. 2001 ; Koumassi H. 2014) et particulièrement au Burkina Faso dans le bassin versant du Kou (Tirogo Y. 2016).

2.1.2.3. Variations interannuelles des températures dans le bassin versant du Kou

La température moyenne annuelle montre une tendance continue à la hausse (figure 9) contrairement à la pluie qui connaît des fluctuations.

Figure 9 : variabilité interannuelle de température dans le bassin versant du Kou (1950 – 2018)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

La figure 9 montre que les températures moyennes varient entre 26°C et 28°C. On constate une variation en dents de scie, avec une tendance à l'augmentation de la température moyenne annuelle. Cette tendance est en conformité avec les perceptions des populations paysannes. (Appuyer avec les statistiques de l'enquête) La droite de tendance de coefficient directeur positif (0,0218) montre une croissance de la température au cours des soixante dernières années. La corrélation entre la variable temps et la température est expliquée à 64,17 % par le coefficient de détermination (R^2). Ainsi, la température croît de façon régulière avec une faible dispersion de la variance autour de la courbe tendance.

Des tendances similaires ont été détectées à l'échelle globale et dans la zone ouest africaine. Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (IPCC, 2007), la température à la surface de la terre a augmenté d'environ 0,74 °C entre 1906 et 2005 avec une plus forte intensité entre 1998 et 2005. Plus récemment, Collins (2011) rapporte qu'en Afrique de l'Ouest, sur la période de 1970 à 2010, la température a augmenté d'environ 0,5-0,8 °C avec une plus forte amplitude sur les 20 dernières années.

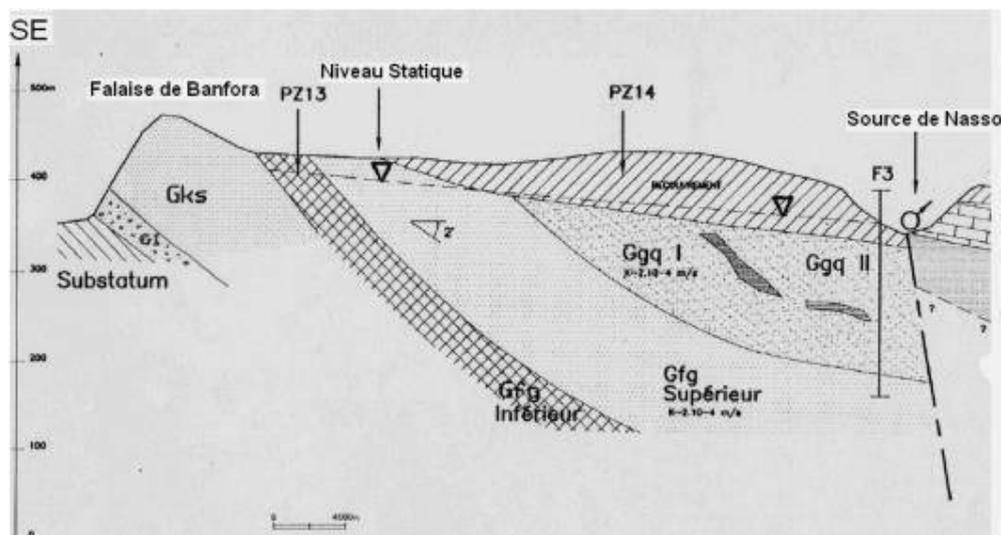
2.1.3. Caractéristiques géologiques

L'aspect géologique des terrains influence non seulement sur le ruissellement des surfaces, mais également sur l'écoulement souterrain. Dans le premier cas, si de la terre est arrachée lors du

ruissellement, on parle alors d'érosion hydrique des sols. Elle provoque un déplacement de sol de l'amont vers l'aval. C'est l'une des principales formes de dégradations des sols dans le bassin versant du Kou.

Le bassin versant du Kou constitue l'extension Sud-Est du bassin sédimentaire de Taoudenni dont le remplissage a débuté vers 1,3 milliards d'années. Le bassin du Kou est composé de cinq formations géologiques à dominance gréseuse : les Grès de Kawara-Sindou (GKS), les Grès fins glauconieux (Gfg), les Grès à granules de quartz (Ggq), les Siltstones, Argilites et Carbonates (SAC1) et les Grès fins roses (Gfr). Ces différentes formations géologiques s'empilent régulièrement les unes sur les autres en couches subhorizontales suivant un léger pendage d'environ 2° vers le NO (figure 10)

Figure 10 : Coupe hydrogéologique et géologique de la zone de Bobo Dioulasso



Source : (SOGREAH, 2014)

2.1.3.1. Les Grès de Kawara-Sindou (GKS)

Cette formation se repose soit sur des schistes très peu perméables, soit sur des granites du socle, en fonction de la morphologie du substratum ou de l'érosion. Les roches réservoirs sont composées essentiellement de grès dont l'épaisseur varie entre 60 m et 350 m (Ouédraogo C. 2006). Elle comporte de nombreuses stratifications obliques tabulaires et ripple-marks et comprend deux faciès : à la base, le faciès grossier de Kawara et au sommet, le faciès de Sindou (Gombert P. 1998 ; Ouédraogo C. 2006). La formation des GKS est très fracturée suivant deux directions prédominantes : SSE-NNO et SO-NE.

2.1.3.2. Les Grès fins glauconieux (Gfg)

Il constitue le rebord supérieur de la falaise de Banfora (figure 10). Il est formé au sommet par une couche imperméable d'argiles à passées gréseuses. Cette couche constitue le toit d'une série gréseuse épaisse d'environ 100 à 150 m perméable (SOGREAH, 2014), limitée à la base par des argiles ocre de couleur rouge ou verte imperméables. Son épaisseur moyenne est de 94 m. La formation est peu ou pas fracturée avec la présence d'une faille d'effondrement SO-NE de faible extension. La base des Gfg présente des épisodes d'émersion alors que l'apparition de glauconie témoigne d'un environnement marin franc de plate-forme épicontinentale (Gombert P. 1998). Cette série gréseuse renferme une nappe captive, sollicitée par l'ensemble des industries de la ville. Elle est très étendue, et s'étale depuis la région de Sindou au Sud - Sud-ouest du pays jusqu'à Tougan au Nord.

2.1.3.3. Les Grès à granules de quartz (Ggq)

La formation Ggq est composée de deux niveaux d'aquifères (SOGREAH, 2014). Chaque niveau est séparé l'un de l'autre par une couche lenticulaire d'argile discontinue, favorisant ainsi une connexion hydraulique entre ces deux niveaux. Les données de campagne de diagraphies réalisées par SOGREAH (1994) confirment l'existence, par endroits, d'une couche argileuse entre ces deux niveaux de 15 m d'épaisseur environ. L'épaisseur moyenne de la nappe des GGQ est de 70 m.

2.1.3.4. Les Siltstones, Argilites et Carbonates (SAC1)

C'est une formation hétérogène. Elle est séparée des GGQ par une série d'argiles rouges ou jaunes d'épaisseurs variables. Cette série argileuse disparaît au voisinage des sources où une faille d'effondrement NNWSSE met en contact hydraulique les SAC1 et les GGQ (figure 10). Toutefois, elle constitue le mur d'une nappe puissante dont le réservoir est constitué par des grès rouges très grossiers et glauconieux. Le toit de la nappe est constitué par une épaisse couche de calcaires dolomités, imperméables et sans aucun signe de karstification (SOGREAH, 1994). Cette formation caractérise un milieu de sédimentation marin peu profond et peu agité, localement et temporairement émergé et soumis à un paléoclimat plutôt chaud et aride.

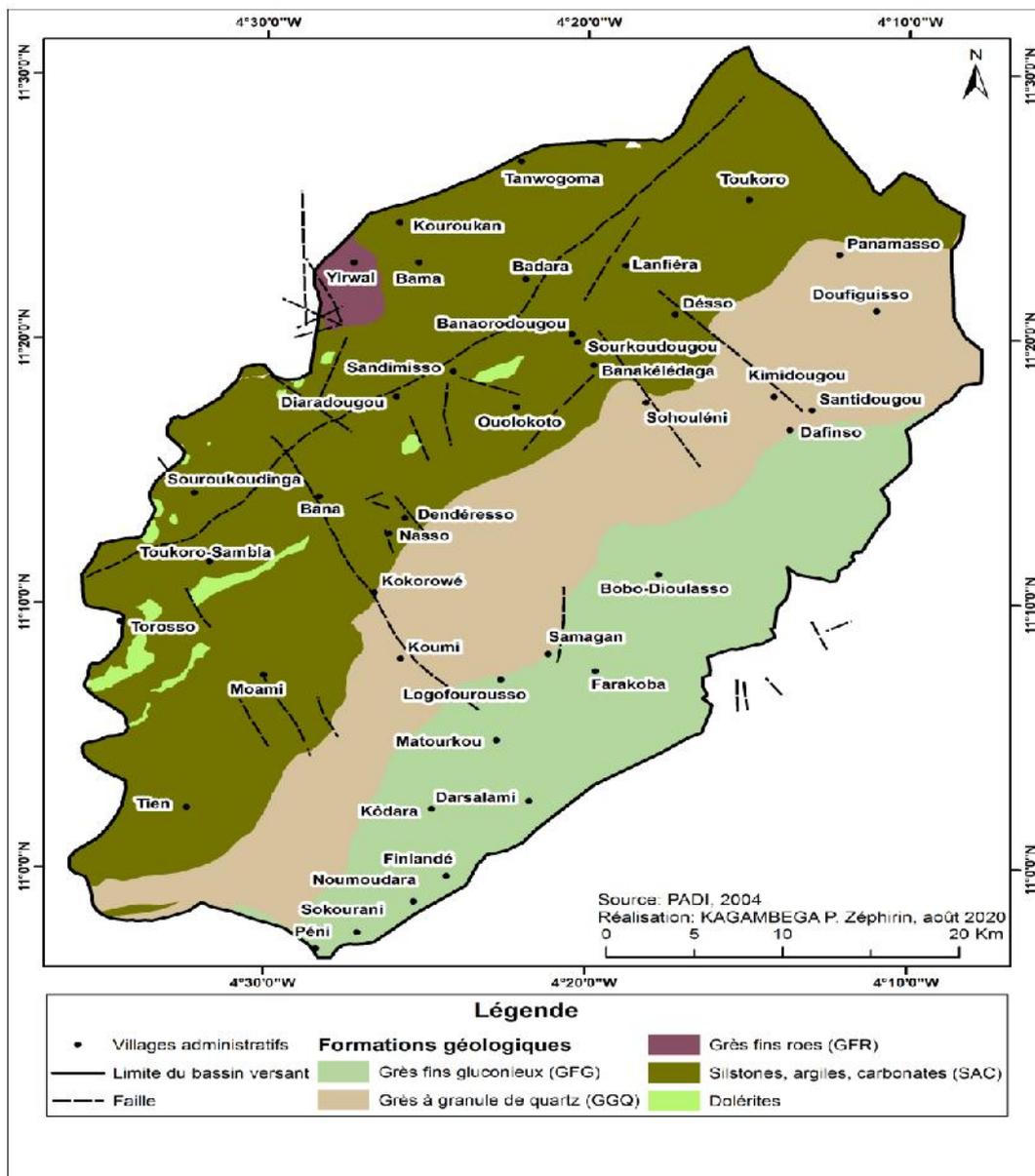
2.1.3.5. Les Grès fins roses (Gfr)

Cette formation s'intercale entre les deux formations des Siltstones, Argilites et Carbonates (SAC1 et SAC2) de la série sédimentaire. Epaisse d'une centaine de mètres, la formation des Gfr occupe environ 25 km² dans le bassin du Kou et affleure dans de nombreux endroits. Cette formation géologique est formée de grès-quartzites fins à très fins, micacés et glauconieux, finement lités, à nombreuses ripple-marks symétriques à crêtes ondulées ou linguoïdes (Ouédraogo C. 2006). On observe localement des pastilles argileuses ainsi que des figures de charge. En forage, on trouve des intercalations de calcaires et de schistes. Le contact des Gfr avec le sommet des SAC1 se fait par disparition progressive des intercalations de schistes et de calcaires. Les Gfr possèdent une meilleure résistance à l'érosion. Cette résistance se traduit de façon générale par un relief resserré.

La tectonique dans le bassin versant du Kou est caractérisée par une structure monoclinale à pendage faible d'environ 2° vers le nord-ouest. Une fracture d'effondrement orientée SW-NE met en contact hydraulique l'aquifère des SAC1 et des GGQ au niveau des sources de Nasso. Elle entraîne à son voisinage des perméabilités très fortes, et serait à l'origine de la genèse des sources de Nasso et par prolongement celles de Pésso/Desso. D'autres failles orientées NW-SE sont associées à celles-ci (SOGREAH, 1993).

Quant aux formations superficielles elles sont constituées des latérites, des alluvions argileuses ou sablo-argileuses, et des formations d'altération et de recouvrement, constituées de sables plus ou moins argileux à argile plus ou moins sableuses (SOGREAH, 1994; Gombert P. 1998).

Carte 6 : Formations géologiques du bassin versant du Kou



2.1.4. Caractéristiques géomorphologiques

En géomorphologie, l'érosion est le processus de dégradation et de transformation du relief et donc des sols, roches, berges et littoraux qui est causé par tout agent externe.

D'après Wellens J., Compaoré N.F. (2004), le bassin versant du Kou du point de vue géomorphologique comprend trois grands types d'unités : les reliefs résiduels, les glacis actuels, et les ensembles fluvio-alluviaux (Carte 7).

2.1.4.1. Reliefs résiduels

Les reliefs résiduels comprennent les buttes rocheuses, les buttes cuirassées et les plateaux cuirassés.

- Les buttes rocheuses

Dans le Bassin versant elles comprennent : les montagnes et collines rocheuses:

Les montagnes ont des altitudes comprises entre 450 et 670 m (voir, par exemple, au Sud-ouest du village de Tien). Constituées surtout de grès roses, compacts, durs et homogènes, leurs versants sont de fortes pentes, (15 à 30%) non régulières ; cette irrégularité vient de la différence de résistance aux entailles du ravinement qu'entraînent les variabilités de structure et la lithologie des grès. Les replats et chicots rocheux sur les versants caractérisent les parties ou les strates sont les plus résistantes.

Les collines sont formées par des grès affleurant ou sub-affleurant. Elles sont constituées de schistes dits de Toun. Elles ont généralement à leur sommet des plateaux cuirassés, en lanières. Ces plateaux sont soit des lambeaux du Haut-glacis cuirassé du pléistocène (400m d'altitude), soit de ceux du Moyens-glacis cuirassés du pléistocène plus récent (300 à 360 m d'altitude). Il ne reste plus que des dômes larges quand la cuirasse sommitale se démantèle.

- Les buttes cuirassées

Ces buttes sont constituées soit du pléistocène ancien (400m d'altitude), soit du pléistocène plus récent (300 à 360m d'altitude). Elles correspondent au Haut glacis de la nomenclature de P. Michel. Elles sont représentées essentiellement par des buttes résiduelles ferrugineuses conglomératiques (matériaux grossiers réunis par un ciment siliceux), toujours bordées par un escarpement ou talus jonché de gravillons et blocs de cuirasse disloquée. Leur alignement est NNE. Les versants sont rectilignes ; ils ont des pentes comprises entre 4 et 15%, une couche remaniée de matériau colluvial superficiel qui repose sur le grès, quelquefois sur ses altérites indurées (carapace) ou non (plinthite).

- Les plateaux cuirassés

Les plateaux cuirassés arment les sommets d'interfluves. Ils sont d'altitude située entre 360 et 400m pour les plateaux des cuirasses du pléistocène ancien.

Les plus fréquents sont du pléistocène plus récent et correspondant au Moyen glacis de la nomenclature de P. Michel. Ils sont d'altitude située entre 260 à 360m, et suivis par un versant dénommé « glacis-versants carapacés » : Le passage au système de glacis actuels se fait généralement par une rupture de pente; cela entraîne un décapage en nappe intense et une bande dégradée de 10 à 200 m de large qui caractérise souvent la base du « glacis-versant ».

Ce versant est le plus souvent rattaché au système des glacis et appelé glacis dénudé.

Dans le cas du pléistocène ancien, il s'agit essentiellement de cuirasses ferrugineuses conglomératiques, toujours bordées par un escarpement ou talus jonché de gravillons et blocs de cuirasse disloquée (ex. plateau où se trouve le château d'eau de l'ONEA au Nord de Bobo-Dioulasso).

2.1.4.2. Glacis actuel

Il correspond aux cuirasses ferrugineuses pisolitiques, autochtones, du pléistocène plus récent, et aux surfaces peu ou non cuirassées d'altitude faible et de pente inférieure ou égale à 2% dénommé aussi Bas-glacis.

Le Glacis actuel se caractérise par un haut de pente, une pente moyenne et un bas de pente qui le raccorde aux ensembles fluvio-alluviaux.

En glacis haut de pente et glacis pente moyenne les sols sont généralement des sols indurés peu ou moyennement profonds.

En glacis bas de pente, ce sont aussi des sols indurés mais profonds et/ ou des sols d'apports colluviaux ou colluvio-alluviaux ou des sols à argiles gonflantes (exemple zone de Souroukoudinga).

2.1.4.3. Ensembles fluvio-alluviaux

Ils sont caractérisés par l'ennoyage des lits majeurs par des sédiments alluviaux ou colluvions-alluviaux. Ces sédiments ont été redistribués et homogénéisés sous faible épaisseur d'eau, alimentée en grande partie par les débordements des cours et la remontée de la nappe phréatique dans certaines zones.

L'étendue et la nature de ces matériaux sont fonction de la composition des sols amont. Ce sont surtout des matériaux fins, limons argileux, argiles limoneux ou argiles, qui dominent.

Les ensembles fluvio-alluviaux comportent les plaines, les lits majeurs et mineurs des cours d'eau, et les dépressions, cuvettes, et marécages qui jonchent la plaine.

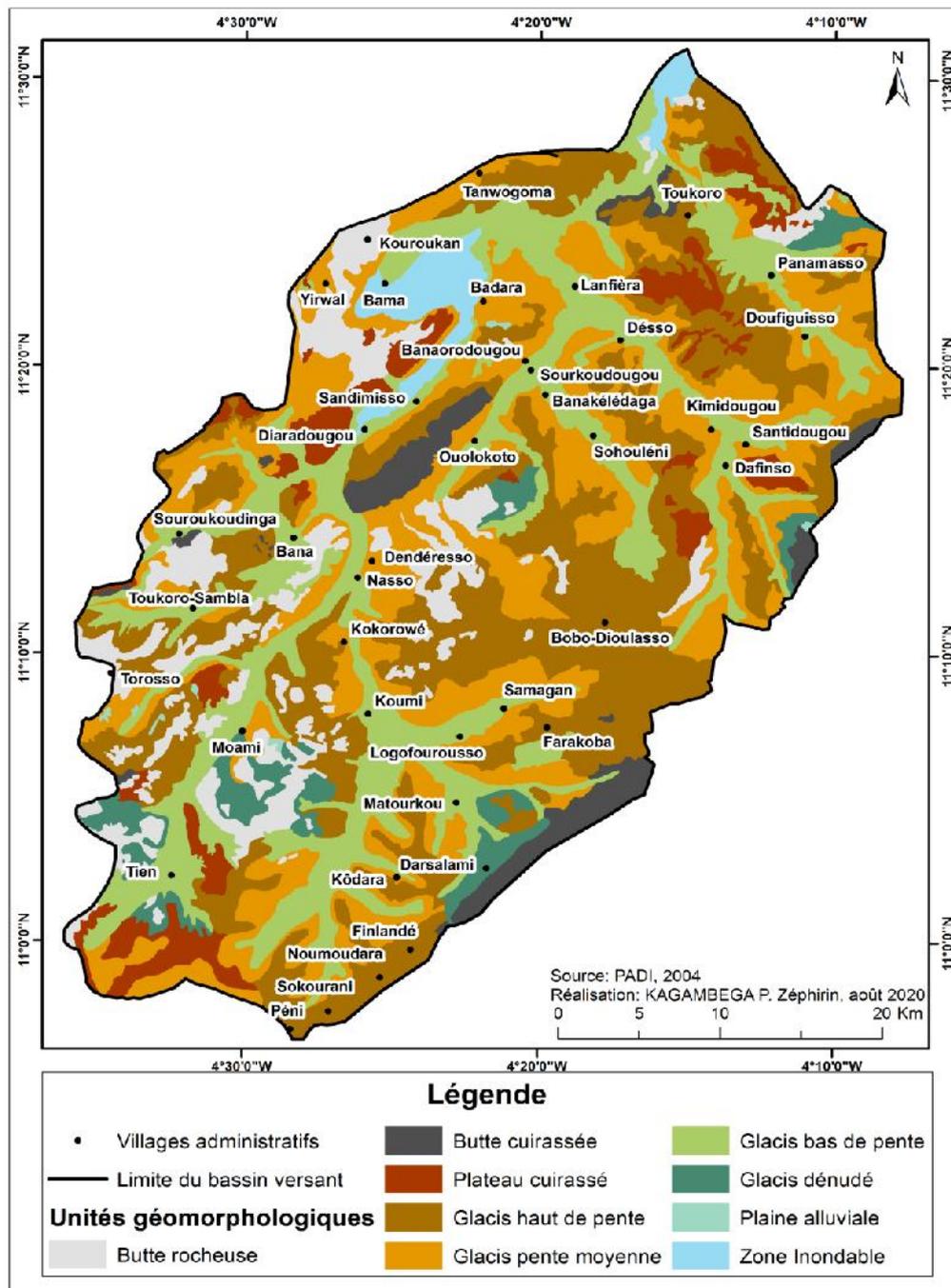
Les plaines se situent au voisinage du Mouhoun (exemple de la zone de Diaradougou à Badala/Bama). Ce sont les parties inondables, quand elles ne sont pas aménagées en maîtrise totale de l'eau. Elles présentent une pente plate ou quasi-plate, et sont relativement étroites (200 à 1500 m). Le matériau est à nette dominance argilo-limoneuse ou argileuse.

Les dépressions et cuvettes se situent dans les plaines inondables.

Les marécages sont les unités les plus basses des plaines inondables, caractérisés par la stagnation de l'eau en permanence : généralement, affleurement de la nappe phréatique.

Les lits mineurs et majeurs des cours d'eau présentent une pente transversale plate, ou quasi-plate, une pente longitudinale de 1 à 3 %, rarement plus. Ils sont très étroits : 5 à 10m pour les marigots, 10 à 20 m pour les rivières. Le matériau est à nette dominance limons argiles sableuses ou argiles limoneuses.

Carte 7 : Unité géomorphologique du bassin versant du Kou



2.1.5. Caractéristiques pédologiques, états et risques de dégradation

Les formations pédologiques résultent de l'action combinée de plusieurs facteurs tels que le climat, les formations végétales, la roche mère, le type d'altération, l'histoire géomorphologique et les actions anthropiques (Kamagaté, 2006).

L'érodabilité d'un sol est une estimation, fondée sur les caractéristiques physiques du sol, de la vulnérabilité de ce sol à l'érosion. L'érodabilité est surtout influencée par la texture du sol, mais elle l'est également par sa structure, sa teneur en matière organique et sa perméabilité. En général, les sols qui affichent une plus grande résistance à l'érosion sont ceux dans lesquels l'eau s'infiltre plus rapidement, ceux qui sont riches en matière organique et ceux dont la structure est améliorée. Les sables, les loams sableux et les sols loameux ont tendance à être moins vulnérables à l'érosion que les limons, les sables très fins et certains sols argileux.

Le bassin versant du Kou est presque entièrement couvert par les sols ferrugineux tropicaux et ferralitiques.

2.1.5.1. Type de sol

Les sols présents sur le bassin versant du Kou (Carte 8) sont principalement de cinq types avec des variantes constitués essentiellement de sous classe (Wellens, J., Compaoré, N.F., 2004).

- Le type des sols ferrugineux tropicaux lessivés composé de :

Sol ferrugineux tropical lessivé à concrétions (FLC)

Sol ferrugineux tropical lessivé induré moyennement profond (FLIMP)

Sol ferrugineux tropical lessivé induré profond (FLIP)

Sol ferrugineux tropical lessivé induré peu profond (FLIPP)

Sol ferrugineux tropical lessivé induré superficiel (FLIS)

Sol ferrugineux tropical lessivé modal (FLM)

Sol ferrugineux tropical lessivé à tâches et concrétions (FLTC)

- Le type des sols ferralitiques composé de :

Sol ferralitique faiblement désaturé remanié induré (FRI)

Sol ferralitique faiblement désaturé en (B) typique modal (FTM)

Sol ferralitique typique hydromorphe (FTH)

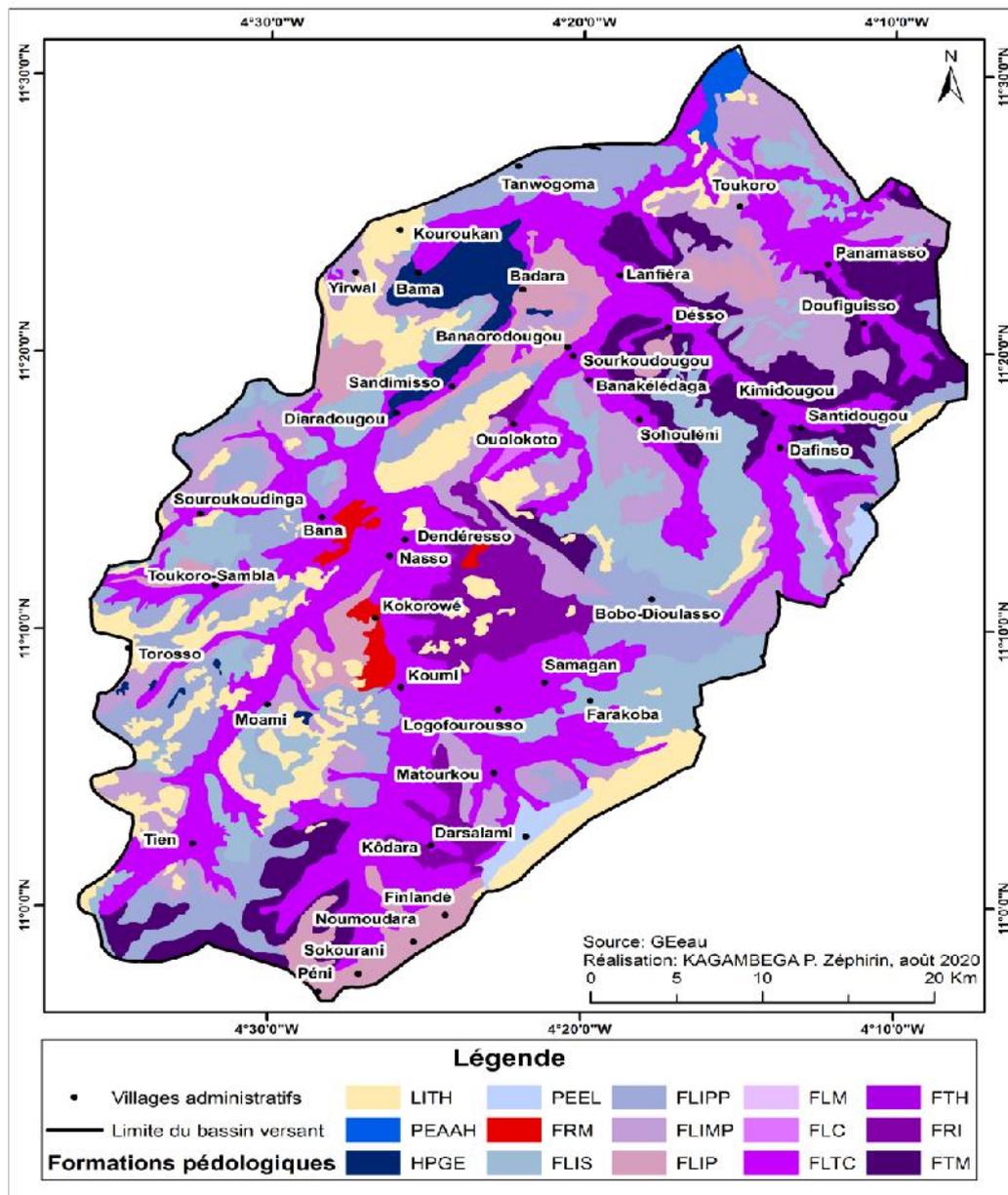
Sol ferralitique faiblement désaturé remanié modal (FRM)

- Le type des sols hydromorphes peu humifière à pseudogley de surface (HPGS/HPGE)
- Le type des sols minéraux bruts d'érosion (LITH)
- Le type des sols peu évolué composé de :

Sol peu évolué d'apport fluvial hydromorphe (PEAAH)

Sol peu évolué d'érosion lithique (PEEL)

Carte 8 : Formations pédologiques du bassin versant du Kou



2.1.5.2. Etats et risques de dégradation des ressources en sol

Les états et risques de dégradation des sols sont examinés à travers les caractéristiques suivantes: la profondeur du sol ; la texture, la structure, l'indice de drainage et le coefficient de perméabilité (Caractéristiques physiques).

2.1.5.2.1. Profondeur du sol

La profondeur ne constitue pas une contrainte dans le cas de bon nombre de sols du Bassin versant du Kou.

Elle ne l'est que dans le cas :

- Des lithosols (cuirasses et roches affleurantes) en inclusions dans certaines unités morphologiques des reliefs résiduels où la cuirasse affleurant ou la roche constitue un impluvium donc les eaux entraînent l'érosion en nappe et en ravines des sols avals.
- Des sols ferrugineux tropicaux lessivés induré peu profond (FLIPP) et des Sol ferrugineux tropical lessivé induré moyennement profond (FLIMP) où le lessivage latéral emporte les argiles et nutriments des horizons supérieurs du sol.
- Et de certains sols hydromorphes peu humifière à pseudogley de surface (HPGE) en cultures céréalière pluviales. Dans ces conditions il y a le risque de dégradation du sol plus élevé dû à l'engorgement du sol, principale cause des états et risques de dégradation des sols et dont les corollaires sont:
 - L'acidification du sol ;
 - La mauvaise minéralisation de la matière (m. o.) ;
 - Activité insuffisante ou nulle ;
 - Le compactage des sols et le manque d'eau pour les plantes.

2.1.5.2.2. Texture

La discontinuité de la texture dans le profil de sol (contraste de texture entre l'horizon supérieur et les horizons moyens et profonds) constitue une contrainte pour l'enracinement des plantes et la pénétration de l'eau en profondeur.

Elle est due au phénomène de lessivage dans les sols FLIP et FLTC notamment. Ce phénomène provoque, pour ces sols un état et risque de dégradation élevé.

En présence de matières organiques suffisantes les textures argileuses sont en principe favorables aux bonnes conditions physiques et chimiques des sols. Les textures LAS et L n'excédant pas 30-35 % de Limon ont une texture parfaitement équilibrée propice à ces

conditions. Les limons fins, très fins et certaines LA offrent souvent une texture très défavorable à la formation d'agrégats du sol.

La texture est donc d'un intérêt évident pour l'évaluation des états et risques de dégradation des sols.

2.1.5.2.3. La structure

La plupart des sols ont une structure massive ou dans le meilleur des cas faiblement développés polyédrique sub-angulaire à éléments grossiers dominant ; ces caractéristiques dues entre autres, au faible taux de matière organique expliquent les états et risques de dégradation structurale élevés au niveau de beaucoup de sols du bassin versant du Kou, les sols ferrugineux notamment.

L'état dégradé de la structure entraîne entre, autres, le sol défavorable :

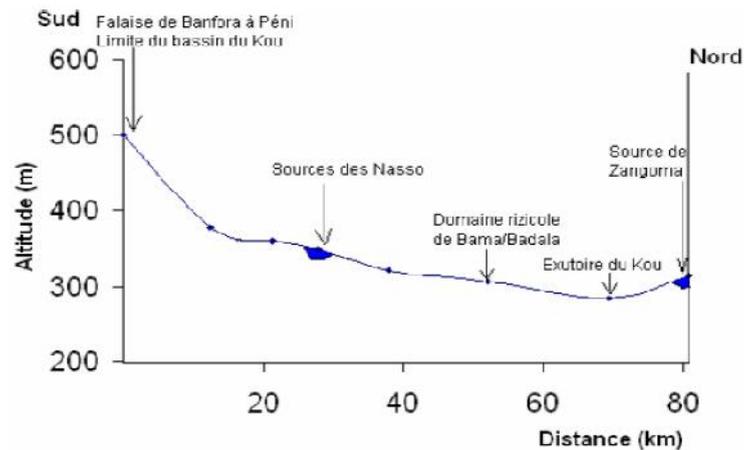
- Aux abondances, répartitions et état sanitaire des racines ;
- Au développement d'une bonne porosité du sol en général ;
- Aux bonnes conditions d'échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère en particulier et entraîne l'asphyxie des racines.
- A l'obtention de bonnes conditions physiques pour assurer l'alimentation des plantes.

2.1.6. Relief et réseau hydrographique

2.1.6.1. Relief

Le bassin versant du Kou est marqué par la présence de plateaux et de pénéplaines auxquels s'ajoutent quelques buttes, collines et vallées. L'amont du bassin du Kou est marqué par la falaise de Banfora avec une altitude de 500 m. Elle constitue la ligne de partage des eaux entre le bassin du Mouhoun et celui de Bourgouriba. A l'aval du bassin, le relief est marqué par des pentes plus douces. L'altitude moyenne varie entre 300 et 400 m (cf. figure 11). On trouve également, dans sa partie Nord-Ouest dans la commune de Bama, une plaine alluviale. La particularité de la topographie et du climat de la région des Hauts-Bassins, en fait un véritable "château d'eau". C'est dans cette région que les principaux fleuves du Burkina prennent leur source : Le Mouhoun, le Banifing et le Tuy (Grand Balé).

Figure 11 : Profil topographique du Sud au Nord du bassin versant du Kou

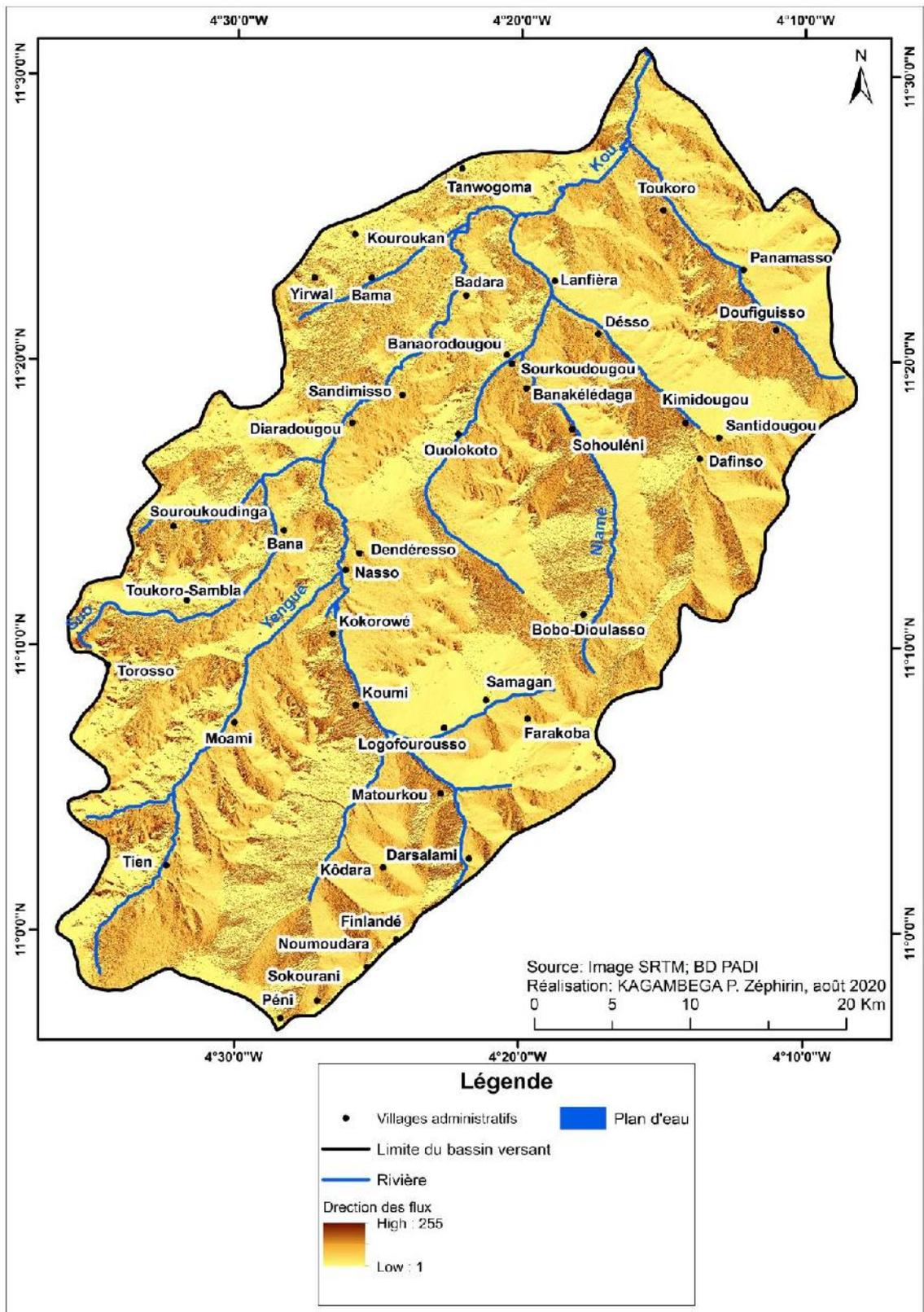


2.1.6.2. Réseau hydrographique

La rivière Kou (Carte 9), affluent de la rive droite du Mouhoun, était une rivière pérenne est devenu depuis quelques années un cours d'eau intermittent en amont des sources de Nasso. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les deux principaux affluents du Kou (le Kiéné et le Farakoba) n'ont plus un écoulement permanent. Formé par la jonction de ces deux cours d'eau, le Kou reçoit successivement les eaux des sources de Nasso, celles des marigots de Yengué en rive gauche et celles des marigots le Niamé et du Houet en rive droite (Lorenzini G., 2007). D'autres ruisseaux non permanents alimentent aussi le Kou.

Une dénivellation de 197 m (environ une pente moyenne de 3.65 m/km) est constatée sur 54 km de longueur entre les sources de Kiené et son exutoire à Badara. La pente moyenne dans la partie amont est de 8.3 m/km. Au niveau du cours inférieur, la pente a une valeur de 1 m/km après le seuil de Koumi à Nasso (Bazongo, 2006).

Carte 9 : Modèle Numérique de Terrain et réseau hydrographique du bassin versant du Kou



2.1.7. Formations végétales

Le risque d'érosion augmente si le sol n'est pas suffisamment protégé par le couvert végétal et/ou une couche de résidus de culture. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et des éclaboussures d'eau. Ils ont aussi tendance à réduire la vitesse d'écoulement de l'eau et à favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol.

L'efficacité de la végétation et des résidus à réduire l'érosion dépend du type, de l'étendue et de la densité du couvert végétal. La meilleure façon de combattre l'érosion est de miser à la fois sur un couvert végétal et sur des résidus de culture qui couvrent complètement le sol et qui interceptent les gouttes de pluie à la surface du sol et près de celle-ci. Les résidus partiellement incorporés et les vieilles racines ont aussi leur importance, parce qu'ils facilitent l'infiltration.

La végétation dans le bassin versant du Kou subit d'énormes dégradations et les ressources forestières deviennent de plus en plus rares sous l'effet de la pression anthropique (le défrichement à des fins d'exploitation agricoles, le déboisement pour le bois de chauffe, les feux de brousse, le surpâturage, la demande sans cesse croissante en produits forestiers non ligneux) (Ouédraogo C. et al, 2006).

La végétation est de type forêt galerie, formation ripicole, savane arborée et arbustive. La forêt galerie est essentiellement le massif du Kou localisée à Kokorowé où on y rencontre des espèces telles *Clorophora excelsa* ; *Berlinia grandiflora* ; *Anogeissus leiocarpus* ; *Carapa procera* ; *Detarium senegalense* ; *Kigelia africana* ; *Elaeis guineensis*, etc. Les savanes arborée et arbustive sont rencontrées surtout dans les jachères.

2.2. Caractéristiques socio-économique du bassin versant du Kou

L'étude de la structure démographique et des caractéristiques socio-économiques permet d'établir les relations entre les sociétés humaines et leur environnement. Cette section traite des caractéristiques démographique et socio-économique dans le bassin versant du Kou

2.2.1. Caractéristiques démographiques du bassin versant du Kou

L'ampleur de la manifestation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou est le résultat de l'association des facteurs naturels et anthropiques. Sur ce plan, le bassin est caractérisé par une diversité de peuplement et des activités, à forte dominance agricole, qui s'y mènent par une population très dynamique.

Le bassin du Kou comporte 51 villages (et campements) y compris Bobo-Dioulasso la deuxième ville du Burkina Faso. Avec une population estimée à 600 000 habitants en 2003, le bassin du Kou représente 71% de la population de la province du Houet. Ce poids démographique est dû à la présence de la ville de Bobo-Dioulasso et qui compte 489 967 habitants d'après le recensement général de la population et de l'habitation de 2006 (INSD, 2008). La densité globale au niveau du bassin du Kou est de 329 hbts /km² alors que la densité de l'espace rural se situe en moyenne à 80 hbts/km² (AEDE, 2004).

La population autochtone est constituée par les Bobo, les Diouala, les Tiéfo et les Sambla (RESO, 1997). Selon une étude menée par l'AEDE en 2004, les producteurs du bassin sont en majorité (73%) natifs du bassin et côtoient dans leurs activités quotidiennes une population étrangère originaire du plateau central (22%) et de la province du Houet (5%). Cette présence relativement importante des migrants dans le bassin est une conséquence de l'installation par l'Etat depuis 1974 des colons mossi sur le périmètre rizicole de la vallée du Kou. Mais également des migrations spontanées sont remarquées et sont le fait généralement des populations du plateau central en quête de bonnes terres cultivables.

Du point de vue foncier ce sont les autochtones (Bobo, Dioula, les Tiéfo et les Sambla) qui sont les propriétaires terriens. Dans la majorité des cas au niveau de chaque village, il existe un chef de terres qui a le droit d'octroi et de cession des terrains. Dans d'autres cas, les terres sont réparties selon les grandes familles. La tendance actuelle est à la vente des terres dans certains villages surtout dans les environs immédiats de Bobo-Dioulasso.

2.2.2. Evolution de la population du bassin versant du Kou

Le taux d'accroissement de la population de la région est de 2.9 % contre un taux d'accroissement national de 3,1 % (INSD, 2006). L'effectif total estimé de la ville de Bobo-Dioulasso pour l'année 2013 est de 609 594 habitants. Le nombre d'habitants de certains des villages riverains du Kou et de la commune de Bobo-Dioulasso obtenu à partir du recensement général de la population de 2006 et leur projection jusqu'en 2013 sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 : Population de quelques villages riverains dans le bassin versant du Kou et de la ville de Bobo-Dioulasso et leur projection jusqu'en 2013

Année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Bobo Dioulasso	489967	505499	521523	538056	555112	572709	590864	609594
Nasso	2316	2389	2465	2543	2624	2707	2793	2881
dienderesso	522	539	556	573	591	610	629	649
Koumi	4073	4202	4335	4473	4615	4761	4912	5067
kokorowé	1059	1093	1127	1163	1200	1238	1277	1318
Samagan	1458	1504	1552	1601	1652	1704	1758	1814
logofourouss	2420	2497	2576	2658	2742	2829	2918	3011

Source : Institut national de la statistique et de la démographie Bobo-Dioulasso, juillet 2008 (INSD)

Selon les projections de l'INSD en 1996, la population de la ville de Bobo-Dioulasso devrait être de 410 504 habitants en 2006. Mais au dernier recensement général de la population et de l'habitat réalisé en 2006, la ville de Bobo-Dioulasso compte 489 967 habitants et pour l'année 2013 on devrait avoir une population de 609 594 habitants. Cet accroissement qui dépasse les prévisions n'est pas sans conséquences sur les ressources naturelles, car on le sait, plus la population croît et plus les besoins augmentent ; ce qui accentue par voie de conséquence la pression sur les ressources naturelles.

2.2.3. Aspects économiques dans le bassin versant du Kou

Diverses activités économiques sont pratiquées par la population dans le bassin versant du Kou. Les principales activités sont l'agriculture et l'élevage, d'autres activités économiques comme l'industrie est aussi développée du fait de la présence de la ville de Bobo Dioulasso.

2.2.3.1. Agriculture

L'agriculture demeure la principale activité de production dans le bassin versant du Kou. Les systèmes de culture consistent surtout en cultures pluviales strictes, en cultures de bas-fonds et petite irrigation pratiquée sur les périmètres aménagés par l'Etat et des périmètres dits informels. L'agriculture est dominée à tout point de vue par la filière céréalière du fait de son poids important dans la production totale du bassin, elle occupe en effet 70% des superficies emblavées et dégage une production brute en volume de plus de 45%. Les autres productions se partagent le reste des superficies soit 30%. Parmi elles, deux filières se distinguent à savoir la filière fruits et légumes et la filière coton. Les autres cultures se partagent seulement 6% des superficies; elles ont en majorité une vocation commerciale, ce sont l'arachide, le sésame, le niébé et les féculents. La filière céréalière n'est pas la plus productive si on la compare à la filière fruits et légumes. Il est vrai qu'avec 70% de la superficie agricole du bassin, elle participe à 45,4% à la production du bassin tandis que la filière fruits et légumes y participe à 47,7% avec seulement 18% de la superficie. Ce qui donne un rapport par hectare de 4 à 6 fois (AEDE, 2004). Ces systèmes fournissent l'essentiel de la production vivrière rurale et l'essentiel des revenus ruraux et contribuent pour environ 6.000 tonnes par an de production céréalière mise en marché. L'agriculture constitue la base des systèmes de production traditionnels dans le bassin du Kou (Diallo M. et *al*, 2006).

Les activités agricoles sont pratiquées durant toute l'année grâce aux divers systèmes d'irrigations implantés dans le bassin. Le périmètre rizicole irrigué de Bama constitue une exception. Situé à 25 km au nord-ouest de la ville de Bobo-Dioulasso avec une superficie totale de 1 260 ha aménagés, il fait partie d'une vaste plaine de 9 700 ha de superficie dont 2 300 ha sont exploitables. La plaine comprend deux parties : la vallée du Kou et quelques collines de 300 m d'altitude qui limitent la plaine à la sortie de Bobo-Dioulasso (Wellens J. et Compaoré N.F. 2003 ; Wellens J. et Nitchou M. N. 2009).

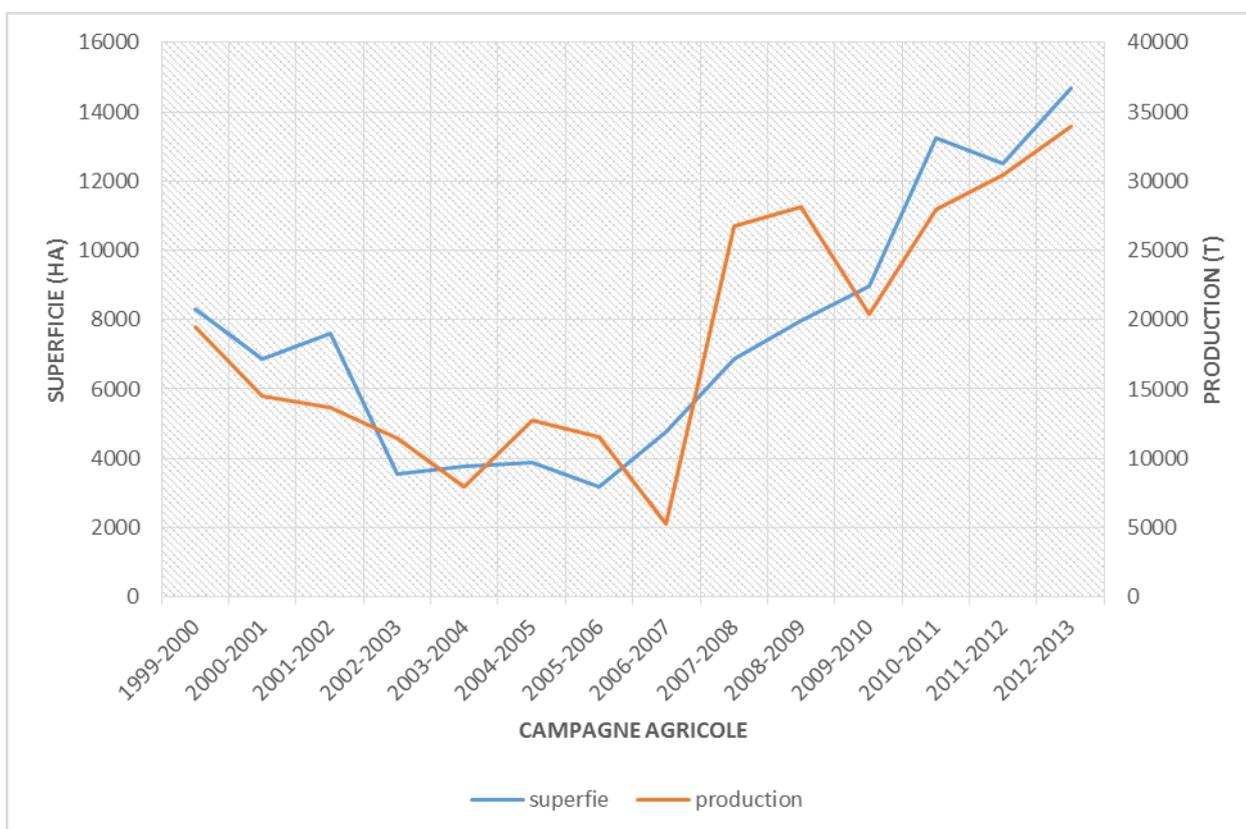
Le périmètre a été réalisé dans le cadre de la coopération entre le Burkina Faso et la République de Taïwan. Les 100 premiers hectares ont été aménagés par la coopération taïwanaise en 1969 et exploités en 1970. L'extension du périmètre s'est poursuivie jusqu'en 1974 (Wellens J. et Compaoré N. F. 2003).

La population est répartie en 8 villages situés sur le périmètre irrigué, majoritairement des producteurs allochtones venus par vagues successives, qui représentent 80 % de la population.

Le riz est la culture dominante, on y fait deux récoltes par an : le riz irrigué et le riz pluvial. La première campagne rizicole ou la campagne de contre-saison est généralement mise en place

courant décembre-janvier. La deuxième campagne rizicole se pratique pendant la période pluvieuse. Depuis l'aménagement du réseau hydraulique, une baisse remarquable des rendements a été observée. La production moyenne était de 7.7 T/ha/campagne en 1980-1981. Et depuis, les rendements se sont stabilisés autour de 4.8 T/ha/campagne de paddy (Wellens J. et Compaoré N. F. 2003). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette baisse des rendements : l'irrégularité dans les allocations d'eau, l'amendement insuffisant des sols et la diminution des débits du Kou due en partie par l'ensablement. La figure 12 présente l'évolution des superficies emblavées et des productions de riz entre 2000 à 2013.

Figure 12: Evolution des superficies emblavées et des productions de riz entre 2000 et 2013 dans la province du Houet



Source: D'après les données de la Direction des Statistiques Sectorielles/DGESS/MASA

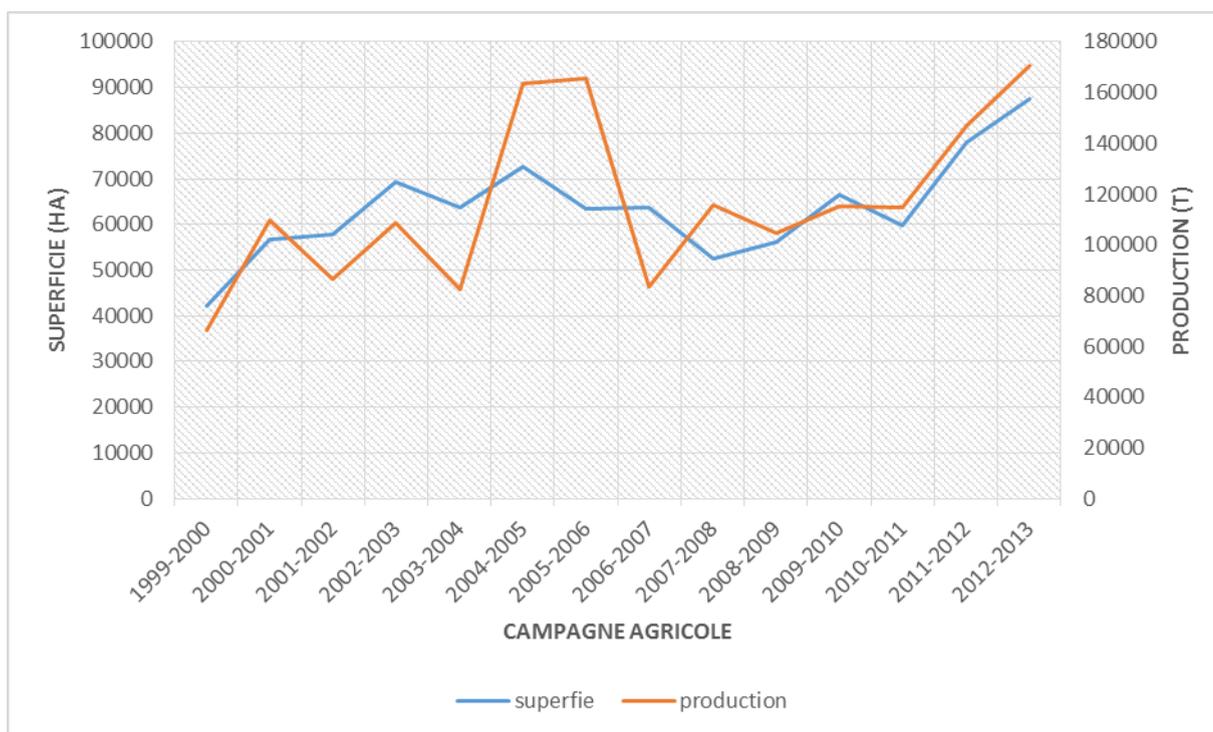
La figure 12 révèle que les emblavures pour la culture du riz ont connu une tendance à la baisse entre 2000 et 2007 avant de prendre son envol en 2007. La courbe de la production a également connu les mêmes fluctuations.

Les autres céréales sont le sorgho, le mil, le maïs et le fonio. Ce sont des grains produits par les plantes de la famille des graminées Elles contiennent principalement des glucides et de 7 à 12 %

de protéines. Le germe de certaines d'entre elles contient une proportion non négligeable d'huile.

Le maïs (*Zea mays*) est la base de l'alimentation de la population. En dépit des conditions favorables dont jouit cette culture, force est de constater que la production du maïs connaît une évolution instable qui fait fluctuer le solde vivrier dans des proportions parfois inquiétantes (figure 13)

Figure 13: Evolution des superficies emblavées et des productions de maïs entre 2000 et 2013 dans la province de Houet



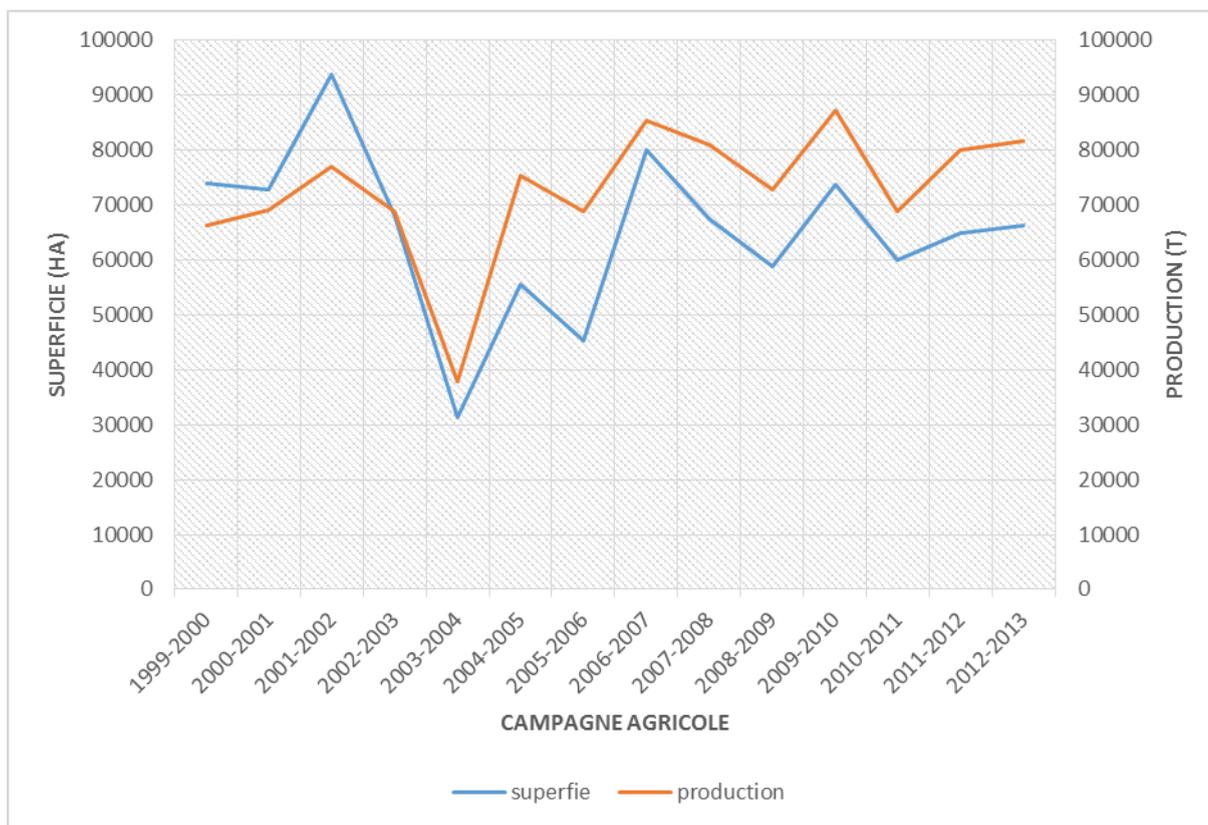
Source: D'après les données de la Direction des Statistiques Sectorielles/DGESS/MASA

L'analyse de la 13 montre que la courbe des superficies emblavées pour la culture du maïs entre 2000 et 2013 adopte une allure en dents de scie. On note une évolution graduelle des superficies entre 2000 et 2005, une baisse entre 2000 et 2008 et ensuite une nouvelle évolution à partir de 2008. La courbe de la production a suivi le même rythme que celle de la superficie emblavée avec un pic entre 2004 et 2007. Le rendement moyen au cours de la période 2000-2005 est de 1.6 t/ha.

Le sorgho (*Sorghum guineensis*) est une amylacée de la famille des graminées alimentaires. Le sorgho ou le gros mil est recherché pour son grain très nourrissant. C'est une plante qui s'adapte

à toutes les conditions climatiques ou pluviométriques (saison pluvieuse ou sèche). Les superficies emblavées dans le milieu d'étude ont connu de diminution à partir de 2004 (figure 14).

Figure 14 : Evolution des superficies emblavées et des productions de sorgho entre 2000 et 2013



Source: D'après les données de la Direction des Statistiques Sectorielles/DGESS/MASA

L'observation de la figure 14 montre que les superficies emblavées ont connu un grand changement dans le temps. Les emblavures ont connu une baisse et ont évoluées en dent de scie à partir de la campagne 2003-2004. Le rendement du sorgho varie de 861 à 1340 kg/ha dans les dans la province abritant le bassin versant du Kou.

2.2.3.2. Elevage

La compactation superficielle du sol est l'un des impacts directs du bétail sur les propriétés physiques du sol. La densité apparente du sol croît lorsque l'on augmente la charge animale. Il résulte du piétinement répété. Les sols riches en éléments fins, limons et argiles non gonflantes, sont les plus sensibles. Le tassement du sol se produit surtout au moment où il est humide, très peu lorsqu'il est sec. La diminution de la porosité qui résulte du tassement réduit les capacités

d'infiltration accroît le ruissellement au moment des chutes de pluies. La végétation, moins bien alimentée en eau, devient clairsemée puis disparaît, la flore s'appauvrit, la production de biomasse diminue.

Dans le bassin versant du Kou, l'élevage constitue la deuxième activité économique après l'agriculture. De type extensif, il concerne surtout les bovins, ovins, caprins, porcins et asins. L'abondance des ressources alimentaire et hydriques fait du bassin versant du Kou une zone d'accueil de prédilection du bétail transhumant pendant la période après récolte. En effet, des études réalisées en 2004 et 2006 sur une partie de la forêt classée de Dindresso ont indiqué d'abondantes ressources fourragères avec de grande capacité de charge (Nacro B. 2006 ; Nacro B. 2007).

2.2.3.2. Industrie

L'industrie occupe une place importante dans l'économie de la zone. Ce volet de l'économie produit 65% du chiffre d'affaire global de la ville de Bobo-Dioulasso soit 175millions de FCFA en 1997 (GIRE). Les plus importantes sont à nos jours la SOFITEX (Société de Fibre et Textile, trois usines), la SOFIB (Société de Fabrication Industrielle Baro), SN-CITEC (Société Nouvelle de la CITEC), SAPHYTO (Société Africaine de Produits Phytosanitaires), SIFA, SOFAPIL, MABUCIG (Manufacture Burkinabé de Cigarettes), BRAKINA (Brasseries du Burkina), SAP (Société Africaine de Pneumatiques), SONACEB (Société Nationale de Cartons et d'Emballages du Burkina), et l'abattoir frigorifique. Depuis 2005 une industrie d'exportation de fruits, notamment de mangues fraîches, s'est mise en place. Il y a une station de conditionnement publique - le Terminal Fruitier - et une station privée.

Conclusion partielle

Au terme de ce chapitre, il ressort que l'analyse bibliographique sur la problématique de la caractérisation des processus érosifs a permis de donner une orientation à cette étude. Le cadre théorique de l'étude a permis d'adopter des méthodes appropriées de collectes de données, de traitement et d'analyse des résultats. Diverses méthodes ont été utilisées pour comprendre la vulnérabilité des sols à l'érosion. Il s'agit de méthodes d'analyses statistiques, descriptives et cartographiques. Ce cadrage méthodologique permet d'atteindre les objectifs de recherche et de vérifier les hypothèses de travail. Il est aussi question dans ce chapitre de la présentation du cadre géographique de l'étude et les fondements biophysiques du bassin versant. Les activités socioéconomiques, notamment agricoles qui sont pratiquées dans le bassin ont été mises en évidence.

DEUXIEME PARTIE :

MANIFESTATIONS ET FACTEURS DE L'EROSION DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

Des informations actuelles, pertinentes et fiables concernant l'érosion des sols sont nécessaires au niveau local et national voire continental afin de restaurer, de protéger et de gérer durablement les ressources en terres, notamment étant donné les incertitudes que font naître les changements climatiques et les impacts des pressions humaines croissantes (Dewitte et *al.*, 2012). Cette deuxième partie présente les manifestations et facteurs de l'érosion dans le bassin versant du Kou et comprend les chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 présente la caractérisation spatiale des formes d'érosion hydrique du bassin versant du Kou. Il s'agit d'une cartographie de la vulnérabilité aux risques d'érosion en se basant sur les facteurs topographiques, d'érodibilité des sols, d'occupation des sols, d'érosivité des pluies. Quant au chapitre 4, il présente les facteurs de l'érosion hydrique des sols du bassin versant en montrant l'évolution des extrêmes pluviométriques et en analysant des données pluviométriques et la dynamique d'occupation des sols par interprétations des images satellitaires.

CHAPITRE 3 :

CARACTERISATION SPATIALE DES FORMES D'EROSION HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU KOU

L'érosion est l'action par laquelle divers éléments constituant les horizons superficiels de la couverture pédologique sont enlevés par le vent, la pluie, les rivières, les glaciers, ce qui peut être favorisé par certaines actions de l'homme consistant à supprimer la végétation couvrant la surface du sol (Akpinfa E. 2017). C'est donc le processus naturel de détachement et d'entraînement des particules de sol par la pluie (érosion hydrique) et le vent (érosion éolienne). Ce chapitre présente les formes d'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou.

3.1 Les formes d'érosion hydrique

Le processus d'érosion se déroule en trois principales étapes que sont : le détachement, le transport et la déposition. Dans la littérature, on distingue trois grands types d'érosion, soit l'érosion en nappe, l'érosion en rigole et le ravinement.

3.1.1. Erosion en nappe

Ce type d'érosion se caractérise par l'effet des gouttes de pluie sur le sol. Lorsque les gouttes de pluie entrent en contact avec le sol, leur énergie compacte, détruit et disperse ses agrégats qui peuvent par la suite être transportés par l'eau de ruissellement.

Selon le Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ) (2000), l'érosion en nappe se caractérise par le déplacement des particules de sol sous l'action combinée du martelage des gouttes de pluies et du ruissellement. Pour Arnold et *al.*, (1989), cette forme d'érosion résulte de l'effet combiné de la pluie et du ruissellement qui éclabousse le sol, détruit sa structure et déplace les particules sous l'action de l'écoulement de surface. Elle se produit assez uniformément sur la pente et peut passer inaperçue jusqu'à ce que le sol arable soit perdu

3.1.2. Erosion en rigole

Les rigoles sont des incisions élémentaires, parfois temporaires et le plus souvent non hiérarchisées (Dipama J-M., 1997). Lorsque la capacité d'infiltration du sol a été dépassée, l'eau s'accumule à la surface du sol et pourra ruisseler sur l'effet de la pente. Cette eau de ruissellement peut provoquer des entailles à la surface du sol. Si le sol n'est pas protégé, certaines de ces entailles, surtout celles produites dans de petites dépressions, deviendront des

rigoles. Selon le CPVQ (2000), l'érosion en rigole résulte du décrochement des particules de sol sous l'effet de l'eau de ruissellement concentré en des chemins préférentiels. Elle est beaucoup plus perceptible que l'érosion en nappe car elle laisse des cicatrices sur les champs. Cette forme d'érosion est caractérisée par la formation de rigoles ou de ravines sur la surface en culture ou aux abords du champ près d'un fossé. Selon Arnold et *al.*, (1989), l'érosion en rigole résulte de la concentration du ruissellement, en petits canaux assez bien définis. Ces canaux sont appelés des rigoles lorsqu'ils sont assez petits pour ne pas interférer avec les opérations de la machinerie. Ces mêmes canaux érodés deviennent des ravins lorsqu'ils progressent et s'étendent au point de ne pouvoir être comblés par les opérations normales de travail du sol, ou lorsqu'ils deviennent nuisibles au travail du sol.

3.1.3. Ravinement

C'est la forme la plus dramatique de l'érosion hydrique du sol. Les ravines se forment une fois que l'eau de ruissellement s'accumule dans les rigoles non traitées. Sous l'effet du volume et de la vitesse de l'eau de ruissellement, ces rigoles deviendront plus larges et plus profondes, formant ainsi des ravines. Selon Hilborn (1996), le ravinement est un stade avancé de l'érosion en rigole où les canaux de surface ont creusé leur talweg à tel point que le travail du sol ne suffit plus à le combler. L'érosion en ravin survient surtout sur les berges des cours d'eau encaissés et dans les longues vallées inclinées. De grandes quantités de terres arables disparaissent chaque année à cause de cette forme d'érosion. La définition du ravinement semble être ambiguë dans la littérature du fait que les critères de distinction entre l'érosion en rigole et le ravinement varient d'un chercheur à l'autre. Toutefois, selon Poesen et *al.*, (2003), une section transversale ayant une aire d'environ 900 cm² distinguerait les rigoles des ravins.

Malgré que le ravinement soit souvent la principale source de sédiments dans les cours d'eau (de Vente et *al.*, 2005 ; Huon et *al.*, 2005 ; Krause et *al.*, 2003 ; Wasson et *al.*, 2002), il est rarement ciblé par les programmes de gestion et de conservation des sols (Poesen et *al.*, 2003 ; Garen et *al.*, 1999 ; Poesen et *al.*, 1996 ; Liggitt et Fincham, 1989). Selon Poesen et *al.*, (2003), au cours des dernières décennies, la plupart des recherches sur l'érosion ont traité de l'érosion en nappe et en rigole. Peu d'études ont été réalisées sur le ravinement en raison de la difficulté à mesurer cette forme d'érosion et à la prédire.

3.2. Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle aux risques d'érosion

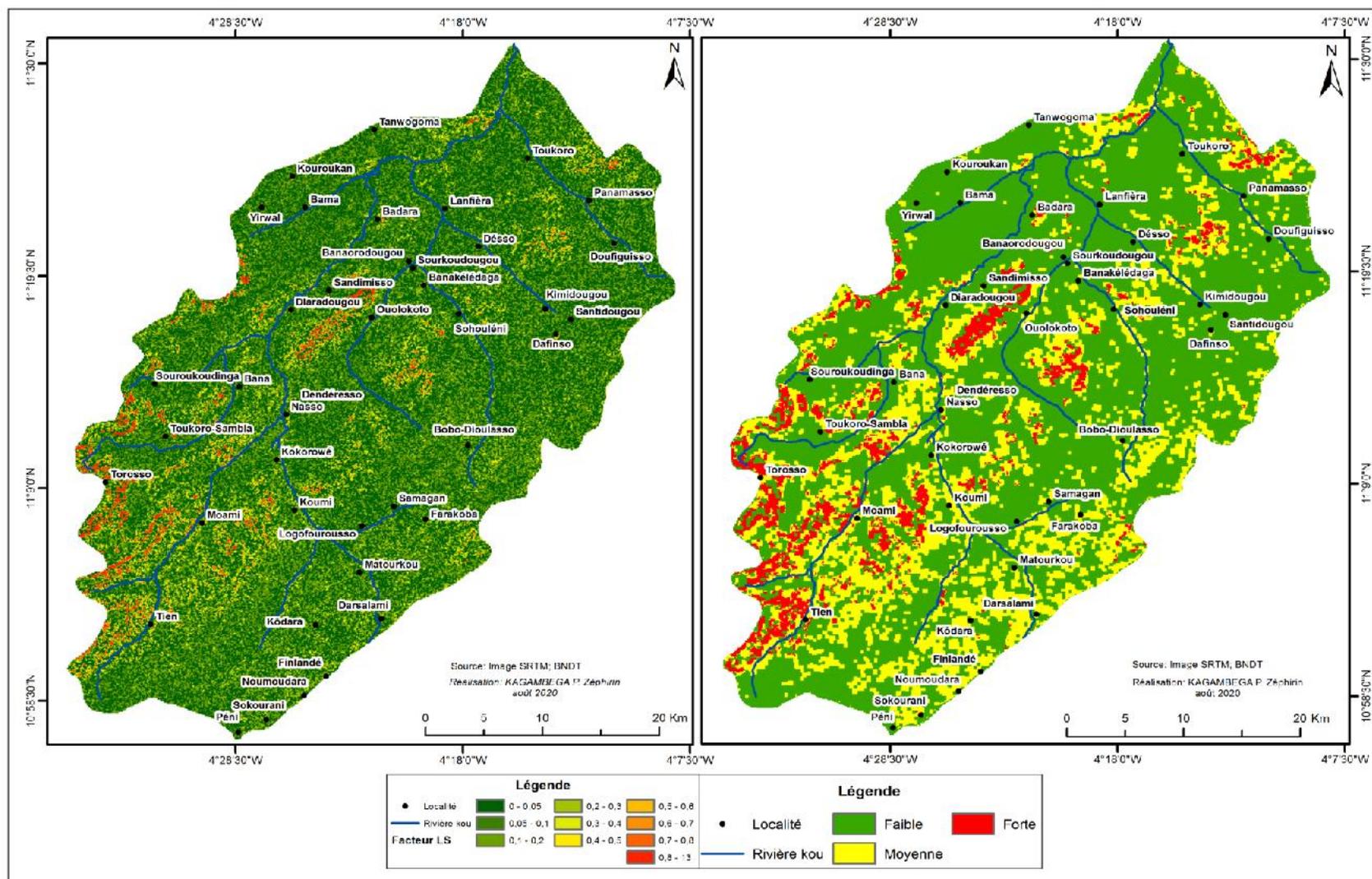
La notion de vulnérabilité n'a pas de conceptualisation unique qui pourrait s'adapter à tous les contextes et à des fins d'évaluation. Dans le cadre de cette étude, la vulnérabilité des sols peut se définir comme leur fragilité face aux agressions extérieures telle que le climat et les actions anthropiques. Elle dépend donc de facteurs intrinsèques et extrinsèques. Elle peut être hiérarchisée en fonction du degré d'exposition aux risques (Boughalem M. et *al.* 2013).

La cartographie du niveau de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou se traduit par la superposition de plusieurs cartes thématiques qui ont été préalablement établies (topographie, pédologie, occupation du sol et précipitation).

3.2.1. Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique représente l'inclinaison S en % et la longueur de pente L en m. En utilisant la formule mathématique de Wischmeier, le facteur topographique (LS) a été calculé à l'échelle du bassin versant à partir de la carte de l'inclinaison des pentes et de leur longueur obtenues à partir de traitements sous SIG du MNT de la zone d'étude. La Carte montre la distribution du facteur topographique LS. Elle permet d'identifier sur l'ensemble du bassin versant de Kou trois classes de pente. De l'analyse de la carte 67,99 % des pentes dans le bassin ont une faible vulnérabilité à l'érosion, 25,82 % ont une vulnérabilité moyenne et 6,18 % des pentes ont une vulnérabilité forte.

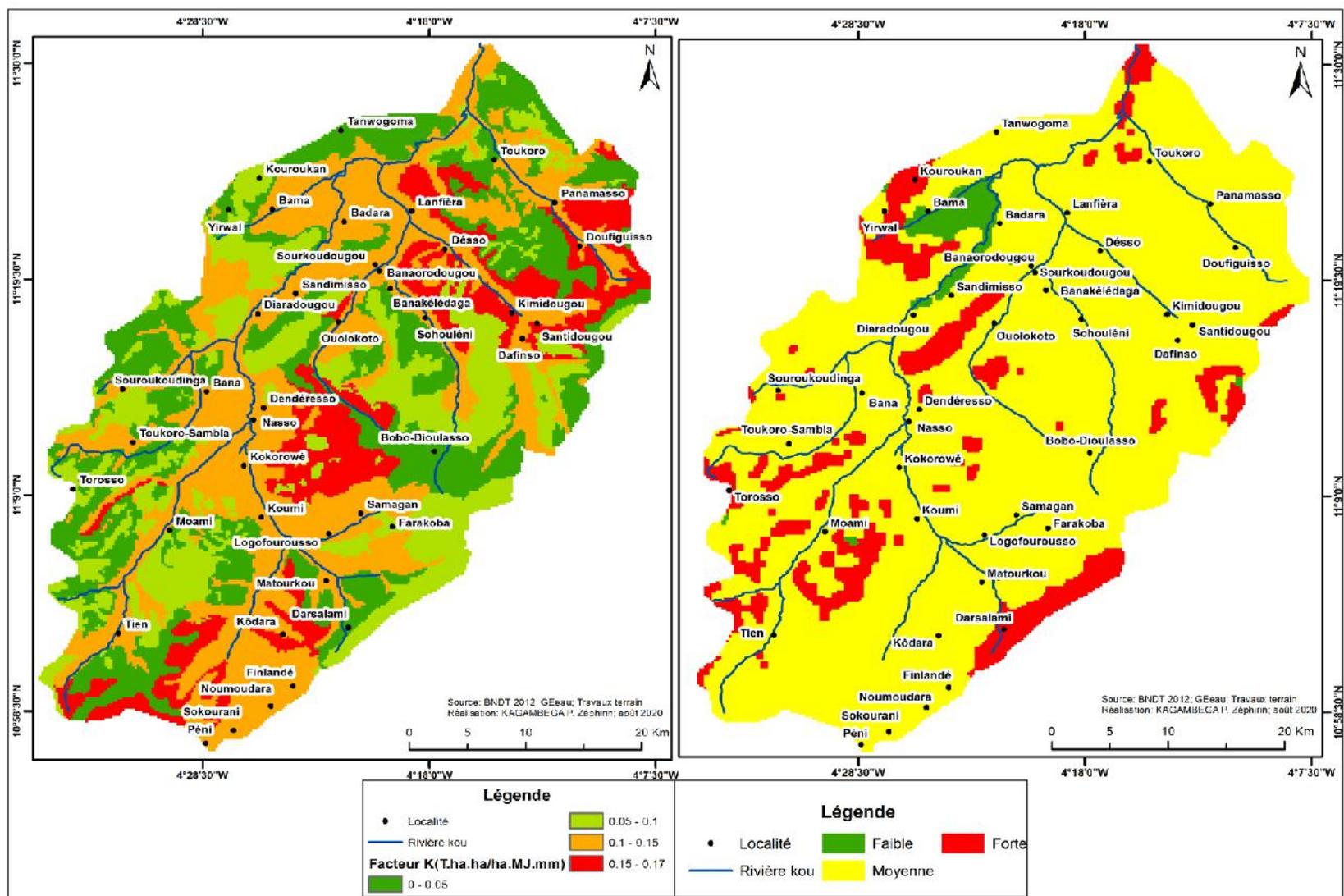
Carte 10 : Distribution du facteur topographique LS dans le bassin versant du Kou



3.2.2. Erodibilité des sols (K)

La carte 11 représente le facteur d'érodibilité K des sols dans le bassin versant du Kou. Trois classes du facteur K ont été réalisées pour exprimer l'étendue de la variabilité de l'érodibilité des sols. La valeur moyenne du facteur d'érodibilité K atteint $0,11 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ sur l'ensemble du bassin versant. Les zones accusant une très faible érodibilité ($K < 0,05 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) sont représentées par les sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés peu profond, indurés moyennement profond et les sols peu évolués d'érosion lithique. Ces sols se trouvent sur butte cuirassé, sur glacis à haut pente et à pente moyenne. Cette classe occupe 2,02 % de la superficie totale du bassin versant. La zone à érodibilité moyenne ($0,1 \text{ à } 0,15 \text{ t/h/ha/MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) est représentée par les sols minéraux bruts d'érosion, les sols ferrugineux tropicaux lessivés induré superficiel et les sols peu évolué d'apport fluvial hydromorphe. Cette classe est la plus représentative du bassin versant avec 86,63 % de sa superficie. La zone à érodibilité très élevée ($> 0,15 \text{ t/h/ha/MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) est représentée par les sols ferralitiques faiblement désaturé remanié induré sur butte rocheuse et glacis à pente moyenne. Elle occupe 11,34 % de la superficie du bassin versant. En général, les sols qui affichent une plus grande résistance à l'érosion sont ceux dans lesquels l'eau s'infiltré plus rapidement, ceux qui sont riches en matière organique et ceux dont la structure est améliorée. Les sables ont tendance à être moins vulnérables à l'érosion que les limons, les sables très fins et certains sols argileux.

Carte 11 : Distribution de l'indice de l'érodibilité des sols (K)



3.2.3. Facteur d'occupation des sols (C).

Le facteur C de l'équation de WISCHMEIER est le rapport entre l'érosion mesurée sous une culture bien précise et celle que l'on observe sur la parcelle nue standard et exprime l'interaction entre la plante et les techniques culturales (Roose, 1975). La détermination du facteur C s'est faite en fonction des types d'occupation des sols dans le bassin versant. Une carte de dynamique d'occupation des sols a été réalisée à base des images Landsat (30 m de résolution) à cet effet. C varie de 1 sur sol nu, soit sa valeur maximale en termes d'efficacité des processus érosifs, à 1/1000ième sous forêt, 1/100ième sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10ième sous cultures sarclées (Payet et *al.*, 2011). La détermination des valeurs de C dans le bassin versant du kou est faite à base des études de Roose (1977) en Afrique de l'Ouest dont le Burkina Faso.

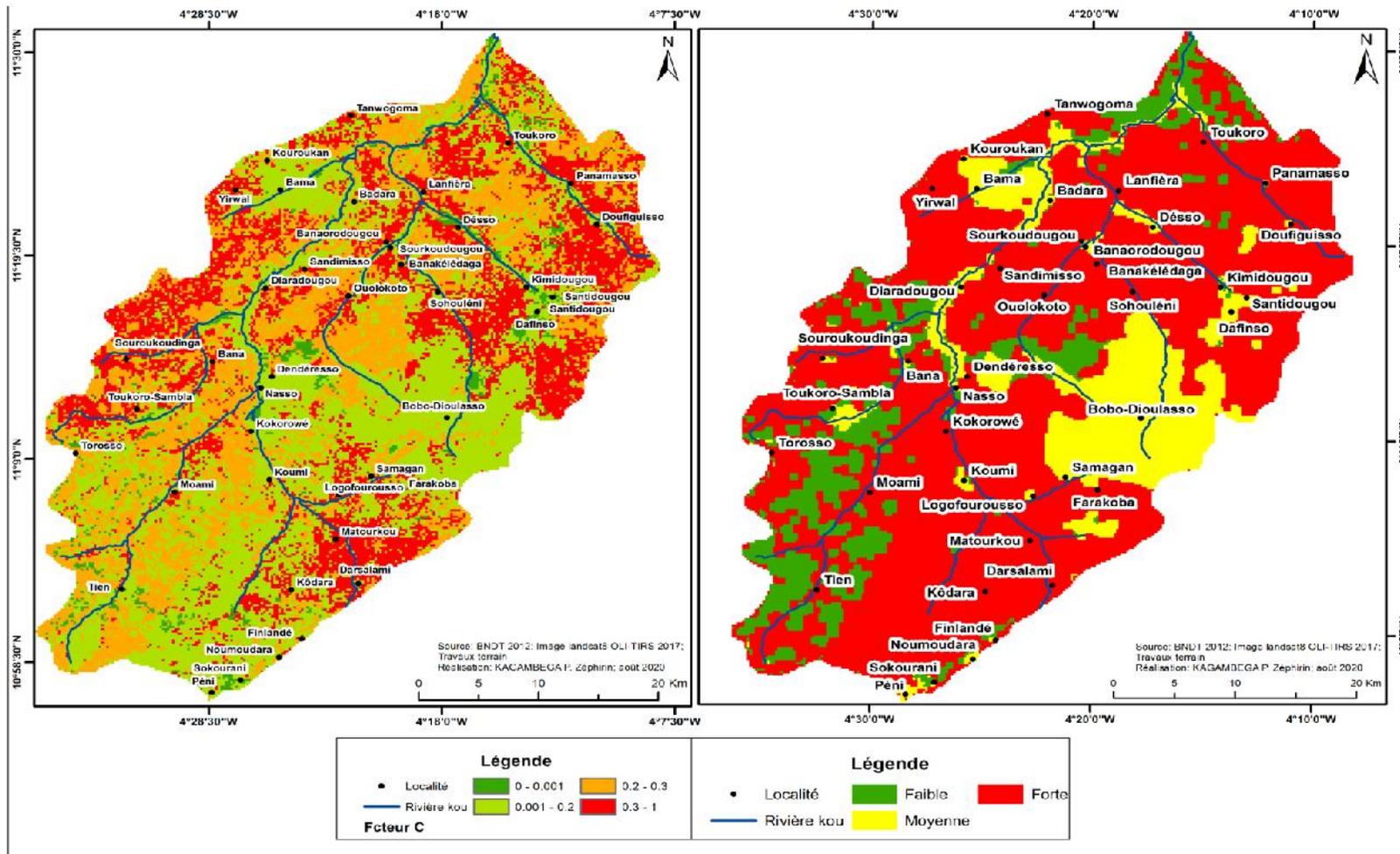
Tableau 9 : Valeur du facteur (C) pour différente occupation des sols en Afrique Occidentale

Couvert végétal et techniques culturales (C)	C annuel moyen
Sol nu	1
Forêt, fourré dense, culture bien paillée	0.001
Savane et prairie en bon état	0.01
Savane ou prairie brûlée ou surpâturée	0.1
Plante de couverture à développement lent ou plantation tardive, première année	0.3 - 0.8
Plante de couverture à développement rapide ou plantation hâtive, première année	0.01 - 0.1
Plante de couverture à, développement lent ou plantation tardive, deuxième année	0.01 - 0.1
Maïs, mil, sorgho (en fonction des rendements)	0.4 - 0.9
Riz de plateau en culture intensive	0.1 - 0,2
Coton, tabac en deuxième cycle	0.5 - 0.7
Arachide (en fonction du rendement et de la date de plantation)	0.4 - 0.8
Manioc, première année et igname (en fonction de la date de plantation)	0.2 - 0.8
palmier, hévéa, café, cacao avec plantes de couverture	0.001 - 0.3
Ananas à plat (en fonction de la pente) plantation hâtive	0.001 - 0.3
Plantation tardive avec résidus brûlés	0.2 - 0.5
Plantation tardive avec résidus enfouis	0.1 - 0.3
Plantation tardive avec résidus en surface	0.001 - 0.01
Ananas sur billons cloisonnés (pente 7%), plantation tardive	0.1

Source : Roose (1977)

L'analyse des informations du tableau 9 permet d'identifier dans le bassin trois zones avec trois différents couverts végétaux allant des zones à forte exposition à l'effet érosif aux zones faiblement érosive. Il se dégage de la carte 18 que 13,12 % de la superficie du bassin versant du KOU est couverte par des valeurs de couverture végétale comprise entre 0,001 à 0,2. Ces zones ont une couverture végétale très dense et sont moins vulnérables à l'érosion hydrique. La classe à valeur de couverture végétale comprise entre 0,2 à 0,3 occupe 15,21 % du bassin. Elle est moyennement vulnérable à l'érosion. La zone a couverture végétale très faible et e plus exposée à l'érosion occupe 71,66 % du bassin En effet, le risque d'érosion hydrique est plus élevé lorsque les sols sont occupés par des cultures peu couvrantes. Par contre, le risque est minimal lorsqu'il s'agit des forêts denses. Il faut noter aussi que le travail du sol influence la sensibilité du sol à l'érosion. Généralement, les cultures nécessitent un affinement de la couche superficielle du sol, ce qui peut entraîner la formation d'une croûte de battance qui en cas de forte pluie, réduit l'infiltration et accélère par conséquent le ruissellement.

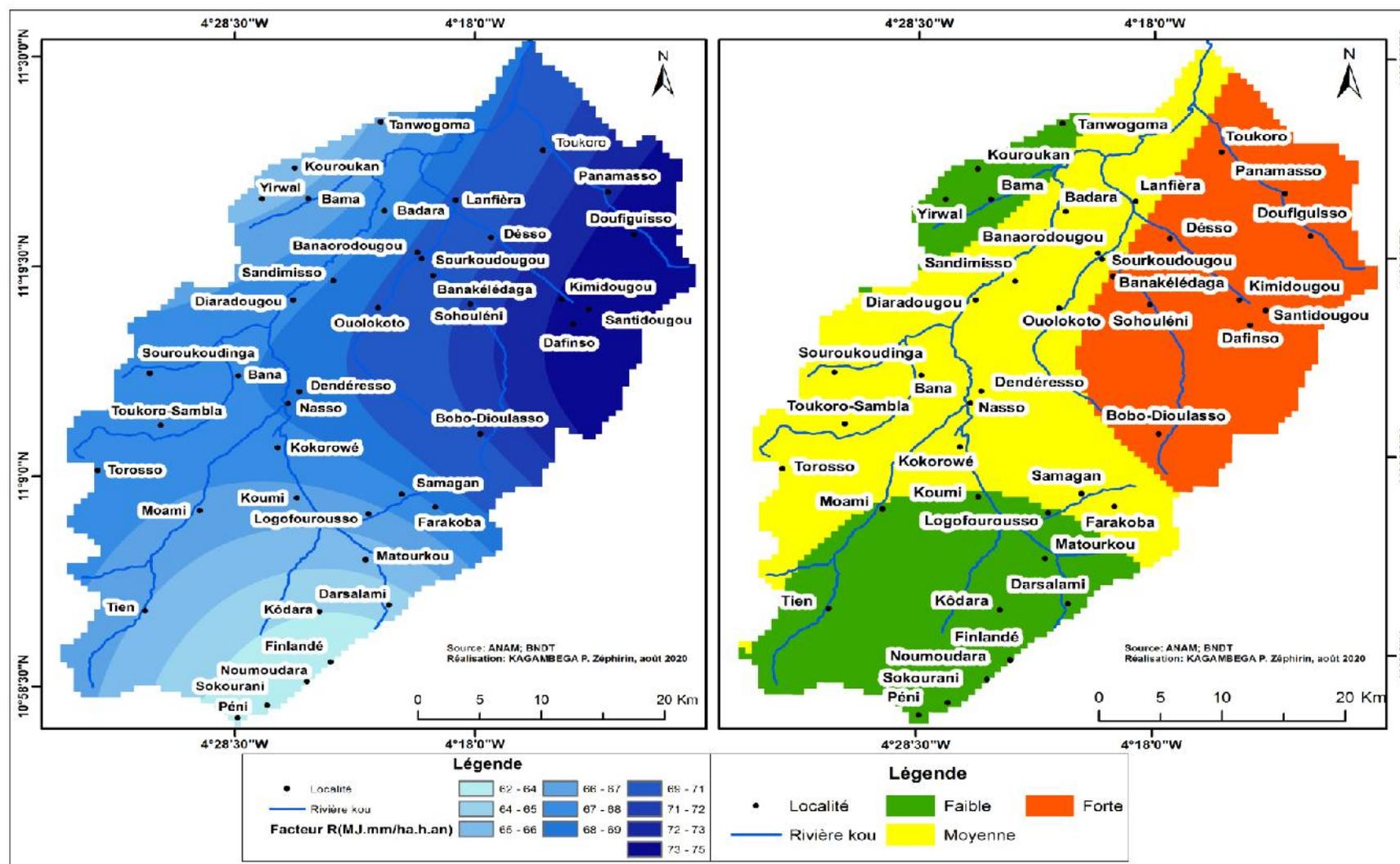
Carte 12 : Distribution spatiale du facteur C dans le bassin versant du Kou



3.2.4. Érosivité de la pluie (R).

La spatialisation des valeurs de l'érosivité des sols à la pluie dans le bassin a permis d'obtenir la carte 13. De l'analyse de la carte de l'érosivité, il découle que la valeur R varie de 62 à 75 MJ.mm/ha.h.an. 29,76 % des terres sont exposées à une forte érosivité, 46,64 % sont moyennement exposées et 27,59 % sont faiblement exposées.

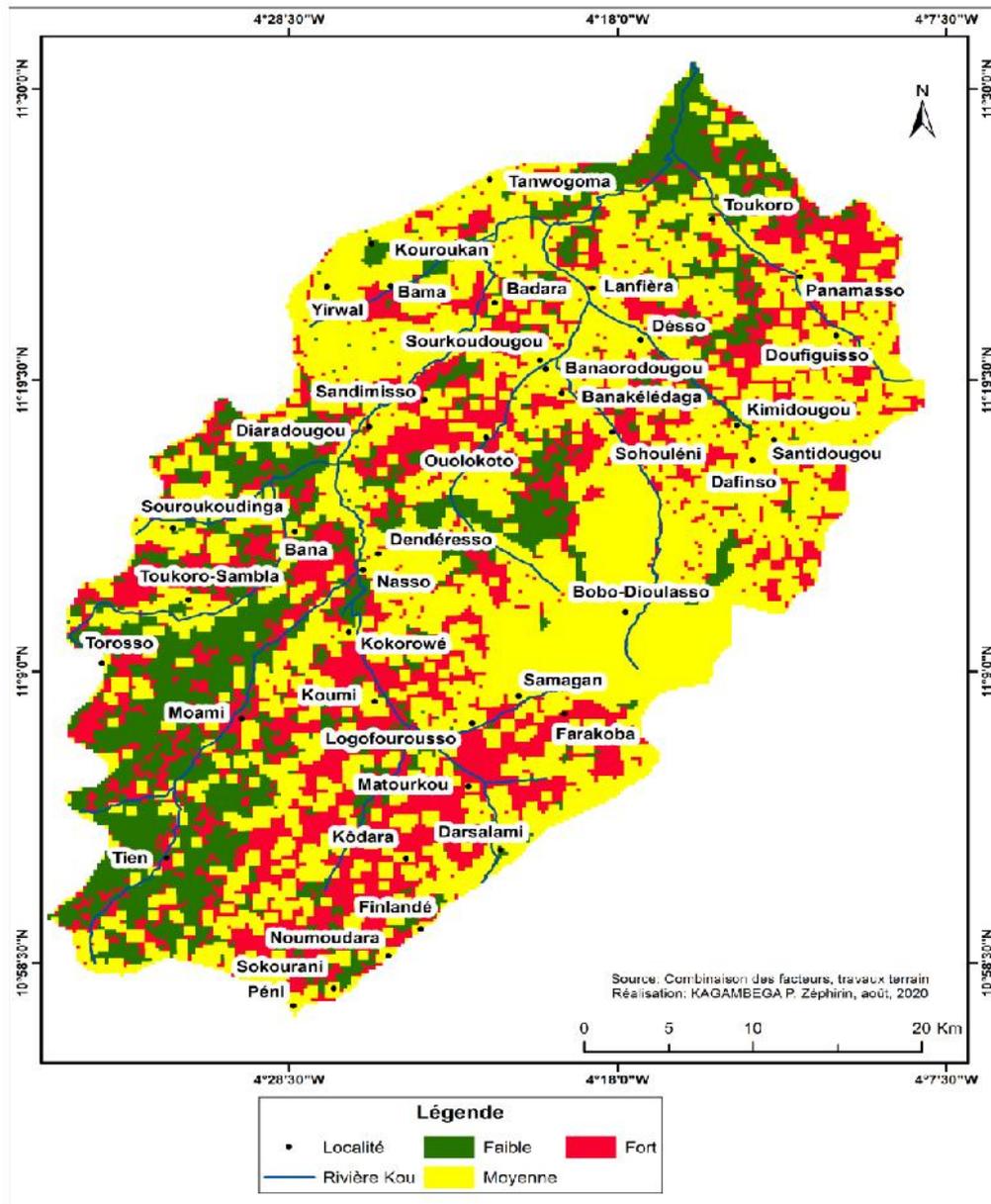
Carte 13 : Distribution de l'indice d'érosivité de la pluie (R)



3.2.5. Vulnérabilité multifactoriel à l'érosion

La carte 14 présente la carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant du Kou.

Carte 14 : Vulnérabilité des sols à l'érosion du bassin versant du Kou



La carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant du kou est obtenue à partir de la combinaison et le traitement sous SIG des différentes cartes factorielles, notamment l'agressivité climatique R (ou érosivité des précipitations), l'érodibilité des sols K, l'effet combiné du degré et de la longueur de la pente (LS) et la couverture végétale C.

La carte fournit des informations sur les zones critiques et la répartition spatiale vis-à-vis de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. 24,69 % des sols dans le bassin ont un fort niveau de vulnérabilité à l'érosion hydrique, 55,49 % avec un niveau de vulnérabilité moyenne à l'érosion hydrique et 19,51 % détenant un faible niveau de vulnérabilité à l'érosion hydrique. Le bassin versant du Kou a donc un niveau de vulnérabilité moyenne à forte. Cette vulnérabilité est due, pour l'essentiel, à une forte pression anthropique, à caractère agricole, qui provoque la réduction du couvert forestier au profit des cultures.

Cependant, tous les critères permettant de caractériser la vulnérabilité des sols à l'érosion n'ont pas pu être exploités. Certains facteurs tels que les pratiques antiérosives et plus généralement les différences d'itinéraires techniques n'ont pas été intégrés au modèle par manque de données, tout comme l'imperméabilité, l'épaisseur du sol pour lesquels nous ne possédons pas de références scientifiques permettant d'évaluer leur influence. Une meilleure connaissance de l'impact de ces paramètres pourra améliorer la qualité des résultats. Concernant les propriétés intrinsèques du sol considérées comme relativement stables, des mesures de terrain sont indispensables, mais elles sont lourdes à mettre en œuvre. Une vingtaine d'années a été nécessaires à Roose E. et Sarrailh (1990) pour tirer des analyses approfondies sur l'érodibilité de quelques sols tropicaux. Concernant les facteurs évolutifs tels que ceux concernant l'occupation du sol, des investigations exhaustives de terrain ne peuvent être envisagées. En revanche, leur suivi et leur étude à l'aide des images satellite s'avèrent fort utiles. Ainsi la cartographie des grands types d'occupation du sol sur le bassin versant du Kou a été réalisée à l'aide des images landsat de 30 mètres de résolution spatiale. Ces limites doivent être considérées et adaptées en intégrant les SIG qui permettent d'une part, de quantifier les pertes annuelles en sols et d'autre part, de cartographier les zones à vulnérabilité érosif.

Plusieurs auteurs ont abordé le phénomène de l'érosion hydrique des sols par analyse des images satellites, ils ont décelé différents facteurs de l'érosion hydrique et calculé la superficie de terre dénudée. Il s'agit des auteurs Sadiki et *al.*, (2004), El Garouani et *al.*, (2007), Payet et *al.*, (2011), Ake et *al.*, (2012), Mesrar et *al.*, (2015), Ouédraogo B. et *al.*, (2019) et Yameogo A. et *al.*, (2021) qui en plus de l'utilisation des SIG pour le diagnostic des facteurs déterminants de l'érosion hydrique des sols, ont procédé à une modélisation du risque

érosif. Les résultats obtenus dans cette étude sont en concordance avec les bases théoriques qui sous-tendent le choix des facteurs influençant la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Les résultats montrent également qu'il est possible d'utiliser les données spatiales suivant un modèle de référence comme l'équation universelle des pertes en terre (USLE) pour la zone soudanienne du Burkina Faso. Malgré les critiques adressées sur l'utilisation abusive de l'USLE dans des conditions autres que celles où elle a été élaborée, il a été montré qu'en pratique, l'approche de modélisation par l'emploi des facteurs de RUSLE demeure une stratégie acceptable pour évaluer l'érosion hydrique des sols (Wall et *al.*, 2002 ; El Hafid et *al.*, 2012). Cette étude constitue une contribution dans la connaissance des facteurs qui alimentent l'érosion dans le bassin versant du kou. Le recours à la géomatique est nécessaire pour l'évaluation des pertes en terre, car la spatialisation des paramètres permet d'élargir les zones d'intérêt qui peuvent dépasser le champ expérimental et considérer des régions ou bassins versants. La carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique obtenue à l'issue de ce travail, pourrait constituer un document d'orientation en vue d'une utilisation rationnelle des sols dans le bassin.

CHAPITRE 4:

FACTEURS DE L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS DU BASSIN VERSANT DU KOU

La durabilité des conditions de développement agricole et de vie économique dépend de notre capacité à gérer les risques associés aux événements extrêmes du climat (OMM, 2009). Parmi ces risques figure en grand plan l'érosion hydrique des sols. De ce fait, la connaissance des facteurs favorisant le développement de l'érosion est nécessaire pour un développement socioéconomique durable. Le présent chapitre analyse les principaux facteurs de l'érosion et leur perception par les paysans du bassin versant du kou.

4.1. Evolution des extrêmes pluviométriques dans le bassin versant du Kou

Les données météorologiques ont été analysées sur une série longue de 60 ans (1958-2017). Le tableau montre les tendances des indices de précipitations extrêmes à la station synoptique de Bobo Dioulasso. Pour se conformer aux normes de l'organisation mondiale de météorologie (OMM), les analyses ont été effectuées sur deux séries normales (1958–1987) et (1988-2017).

Tableau 10 : Tendances des indices de précipitations extrêmes à la station synoptique de Bobo Dioulasso

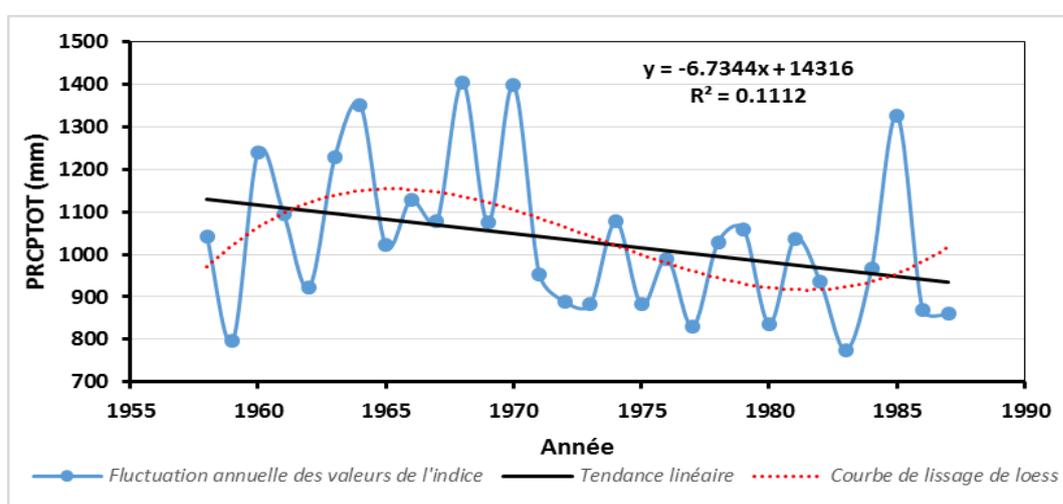
indices	1958-1987		1988-2017	
	p-value	Tendance (mm/an)	p-value	Tendance (mm/an)
PRCPTOT	0,072	-6,732	0,99	-0,045
RX1day	0,04	-0,818	0,356	0,361
RX5day	0,073	-1,252	0,749	0,23
R95p	0,275	-3,071	0,661	1,261
R99p	0,153	-1,917	0,386	1,43
CDD (jour)	0,382	0,581	0,219	0,758
CWD (jour)	0,088	-0,087	0,25	-0,052

4.1.1. Indice des totaux annuels des précipitations (PRCPTOT)

L'indice PRCPTOT ne décrit pas les précipitations extrêmes, mais il est fréquemment utilisé pour évaluer l'homogénéité des séries de données sur les précipitations (Wijngaard *et al.*, 2003) et c'est la raison pour laquelle il a été inclut dans l'analyse.

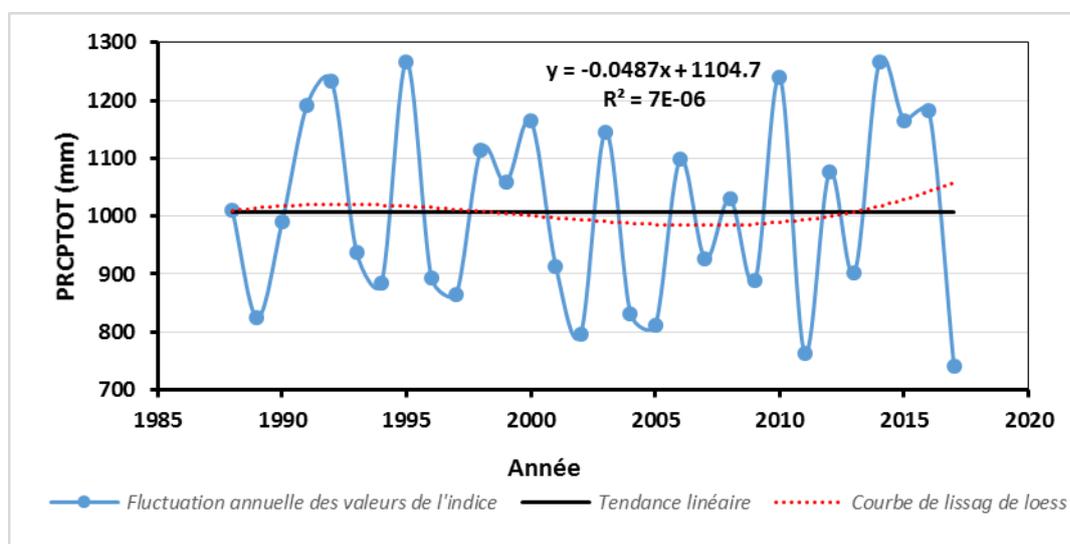
Au cours de la première normale (1958-1987) la tendance de l'indice est en régression de 6,73mm/an. Les pluies baissent de 67,3 mm par décennie. De ce fait, en 30 ans, elles ont diminué de 201,9 mm. Au cours de la deuxième normale (1988-2017) la tendance de l'indice a connu une régression moindre que la première soit 0,045 mm/an et 1,35mm sur la période des 30 ans.

Figure 15 : Indice des totaux annuels des précipitations (PRCPTOT) (1958-1987)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 16 : Indice des totaux des précipitations (PRCPTOT) (1988-2017)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

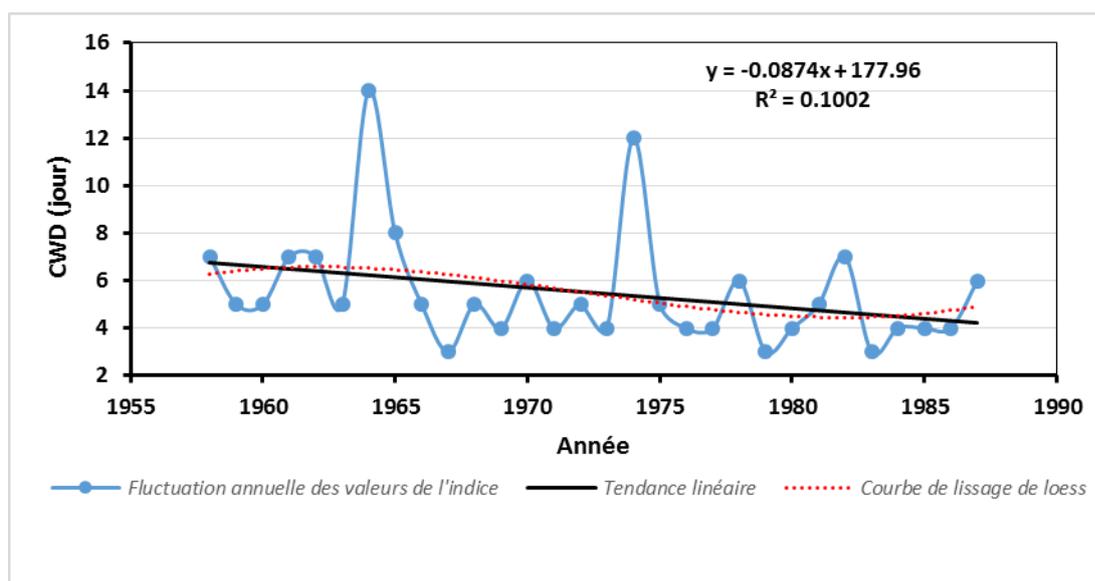
4.1.2. Indices des jours consécutivement humides (CWD) et des jours consécutivement secs (CDD)

Durant la première normale on constate une baisse de l'indice à la station synoptique de Bobo Dioulasso. La pente de la droite de tendance est négative avec une régression de 0,087 jours/an. Les valeurs de cet indice varient entre 3 et 14. Le plus grand nombre de jours consécutivement humides est observé en 1964 avec 14 jours suivis de l'année 1973 avec 12 jours consécutivement humide. Au cours de la deuxième tendance, l'indice est toujours en baisse mais moindre que la première tendance. La pente de la droite de tendance est négative. Cette régression n'est pas trop prononcée avec -0,052 jours/an. Les valeurs de cet indice varient entre 3 et 13 jours. Le plus grand nombre de jours consécutivement humides est observé en 1988 avec 13 jours.

L'indice CCD détermine le nombre maximal des jours consécutivement secs. La droite de tendance de la première et la deuxième normale montre une hausse de cet indice. La tendance est respectivement 0,581 jour/an et de 0,758 jour/an soit une hausse de 5,81 chaque décennie pour la première normale et 7,58 chaque décennie pour la deuxième normale.

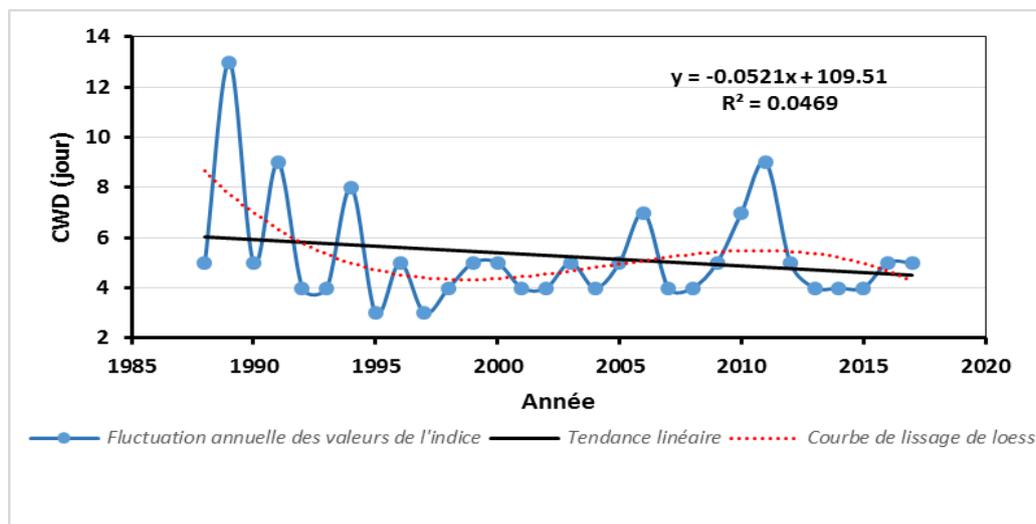
Le bassin versant du Kou connaît une augmentation du nombre de jours des séquences sèches et une baisse du nombre de jours de séquences pluvieuses. Cet état de fait démontre l'augmentation des saisons sèches et le raccourcissement des saisons de pluies dans le bassin.

Figure 17: Indices des jours consécutivement humides (CWD) (1958-1987)



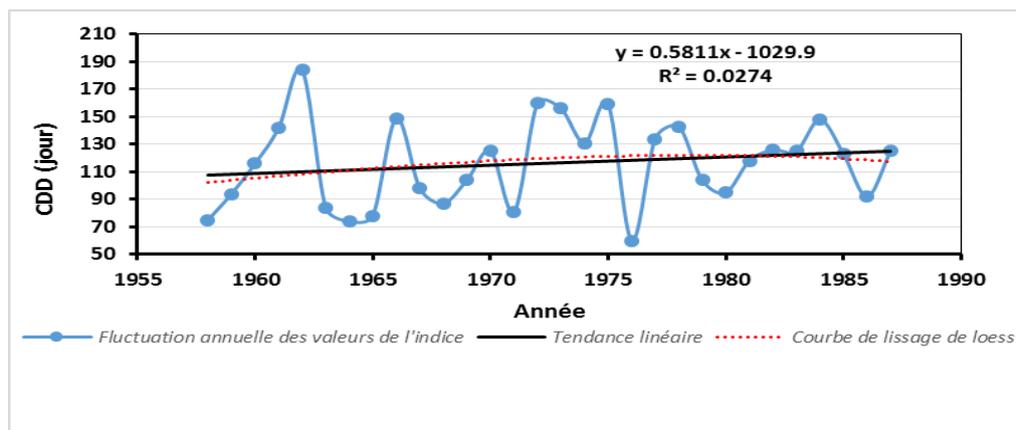
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 18 : Indices des jours consécutivement humides (CWD) (1988-2017)



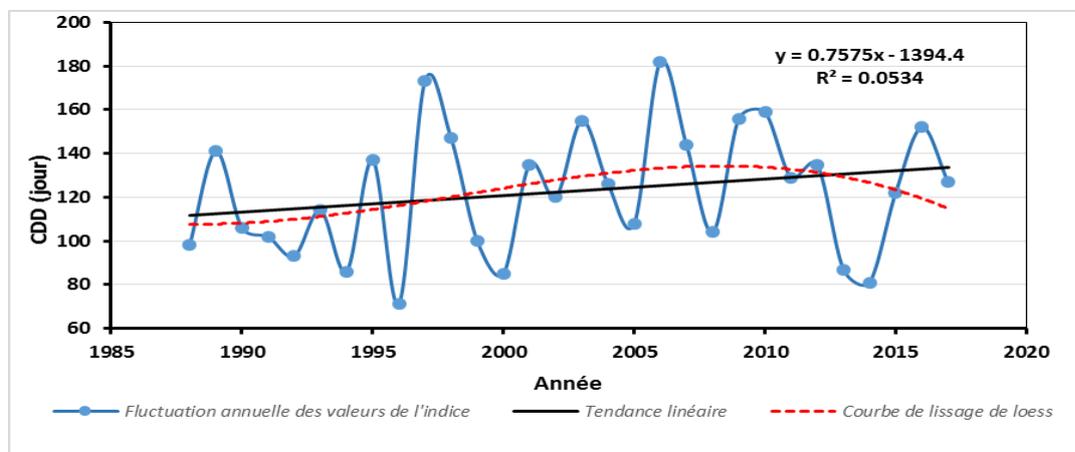
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 19 : Indices des jours consécutivement secs(CDD) (1958-1987)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 20 : Indices des jours consécutivement secs(CDD) (1988-2017)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

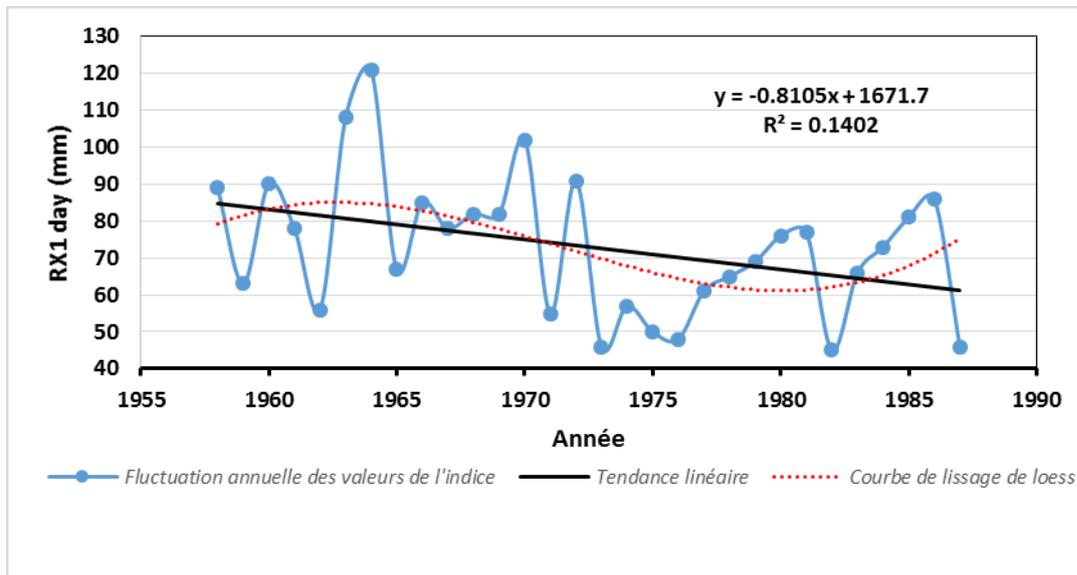
4.1.3. Indices de maximum d'une journée de pluies (R1day) et du cumul maximal des précipitations de 5 jours (RX5day)

L'indice R1day indique la précipitation totale maximale d'un jour pluvieux. La première normale montre que cet indice est en baisse à la station synoptique de Bobo Dioulasso.

La tendance de la droite de régression est de -0,818 mm/an. Cet indice diminue de 8,18 mm/décennie. La deuxième normale est marquée par une hausse de l'indice. La tendance de la droite de régression est de 0,361 soit une augmentation de 3,16mm/décennie.

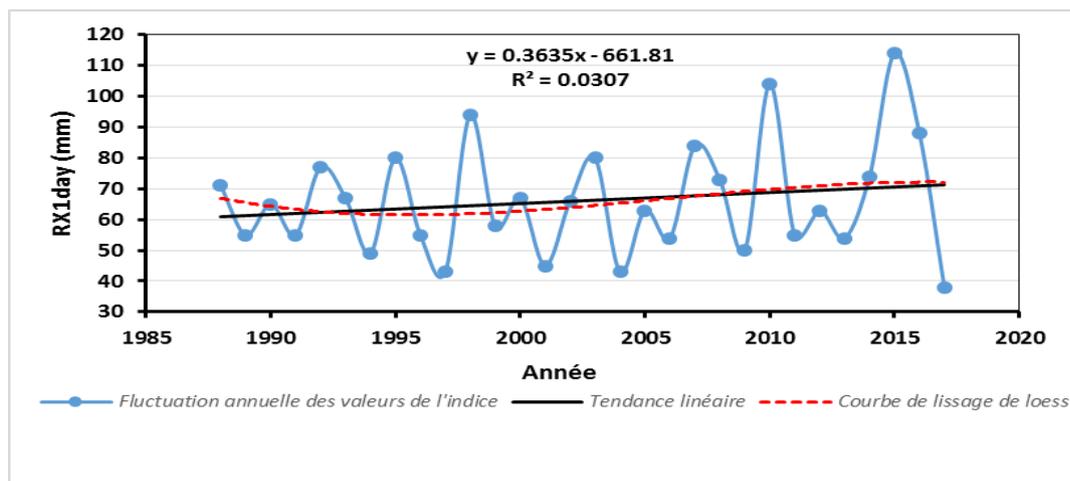
L'indice Rx5days correspond à la précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année. La tendance de cet indice est négative avec -1,252 mm/an sur la première normale et positive au cours de la deuxième normale avec 0,23 mm/an. Cet indice est en baisse de 12,52 mm/décennie et en hausse de 2,3mm/décennie au cours de la deuxième normale.

Figure 21: Indice de maximum d'une journée de pluie (R1day) (1858-1987)



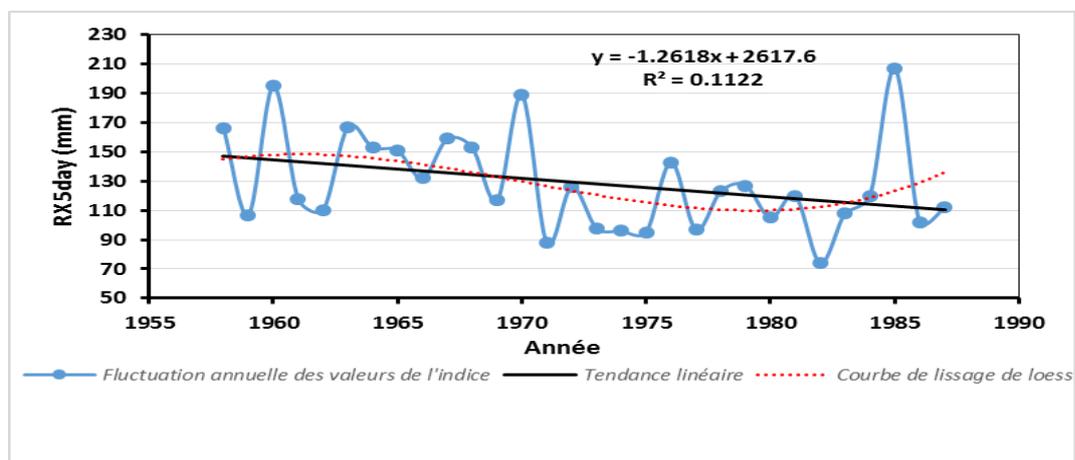
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 22: Indice de maximum d'une journée de pluie (R1day) (1888-2017)



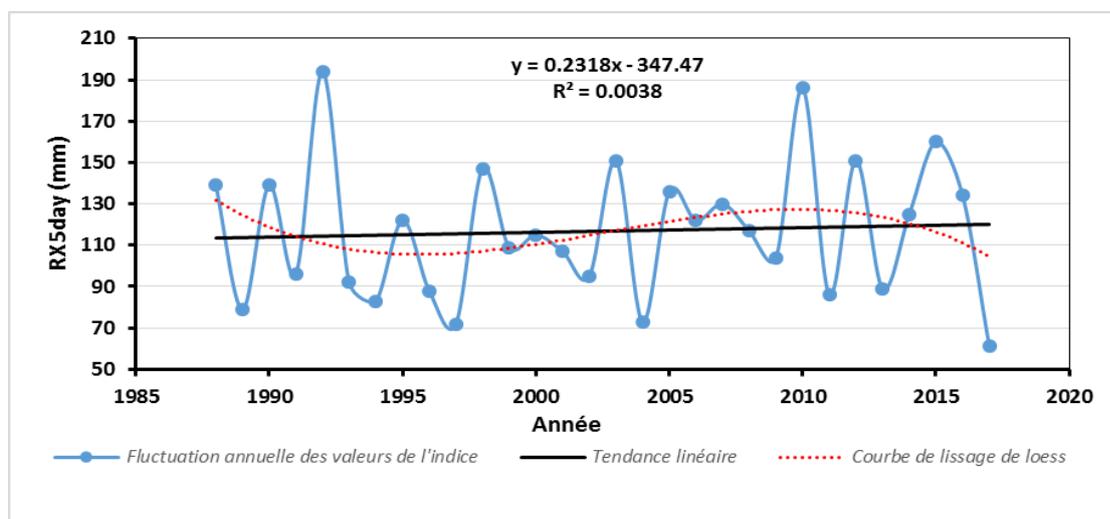
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 23: Cumul maximum des précipitations de 5 jours (RX5day) (1958-1987)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 24: Cumul maximum des précipitations de 5 jours (RX5day) (1988-2017)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

4.1.4. Indices de Jours très humides (R95p) et de jours extrêmement

humides (R99p)

L'indice R95p est le cumul des précipitations supérieures au percentile 95. La première normale montre une baisse de cet indice de -3,071mm/an. En dix ans l'indice a diminué de 30,71mm/an. Au cours de la deuxième normale l'indice a connu une hausse de 1,261mm/an soit 12,6mm/décennie et 37,8mm sur les 30ans.

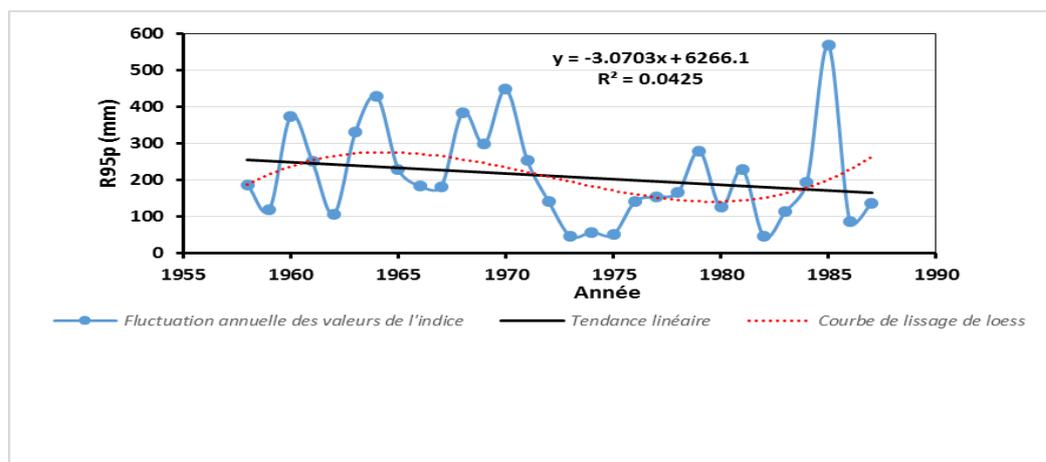
L'observation de la première tendance a permis de constater que les jours extrêmement humides (R99p) sont en baisse de -1,917mm/an. Selon cette tendance l'indice est en baisse de 57,51 mm en 30 ans. Au cours de la deuxième tendance l'indice est en hausse de 1,43 mm/an soit une hausse de 42,9 mm au cours de la deuxième normale.

Les jours très humides (R95p) et les jours extrêmement humides (R99p) constituent les apports journaliers en eau les plus importants par rapports à leurs seuils (au 95è percentile et au 99è percentile). Ils peuvent contribuer aux phénomènes des géorisques naturels notamment les inondations, les glissements de terrains, l'érosion des sols etc., par la quantité d'eau apportée.

D'une manière générale sur les deux normales l'étude a montré une baisse des totaux des pluies (PRCPTOT) et les jours consécutivement humides de l'indice (CWD). Aussi, a-t-elle montré que le nombre de jour des séquences sèches (CDD) est en hausse à la station synoptique de Bobo Dioulasso.

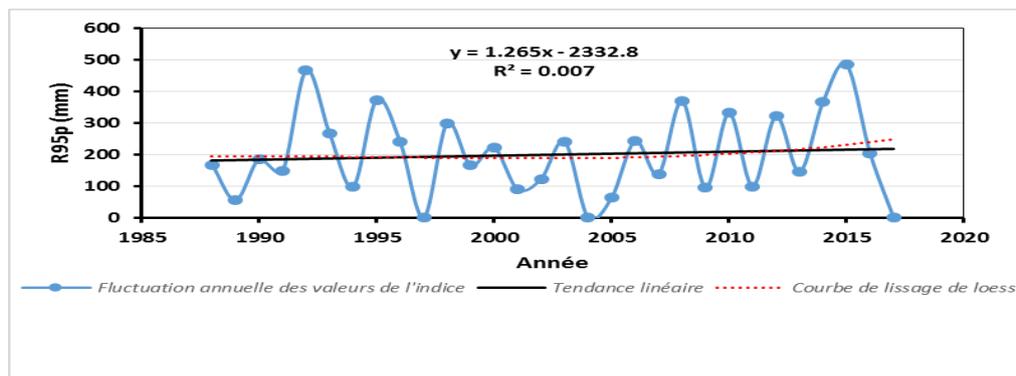
Cette diminution des précipitations totales annuelles est confirmée dans la majeure partie de l'Afrique (Frappart F. et *al.*, 2009; Ozer P. et *al.*, 2009; Hountondji C. et *al.*, 2011). Des résultats similaires ont été observés concernant la réduction globale des précipitations dans les études sur le Sahel (Biasutti M. 2013; Mohamed B. 2011; Ackerley D. et *al.*, 2011; Lebel T. et Ali A. 2009; Nicholson E. et *al.*, 2000).

Figure 25: Indice de jour très humide (R95p) (1958-1987)



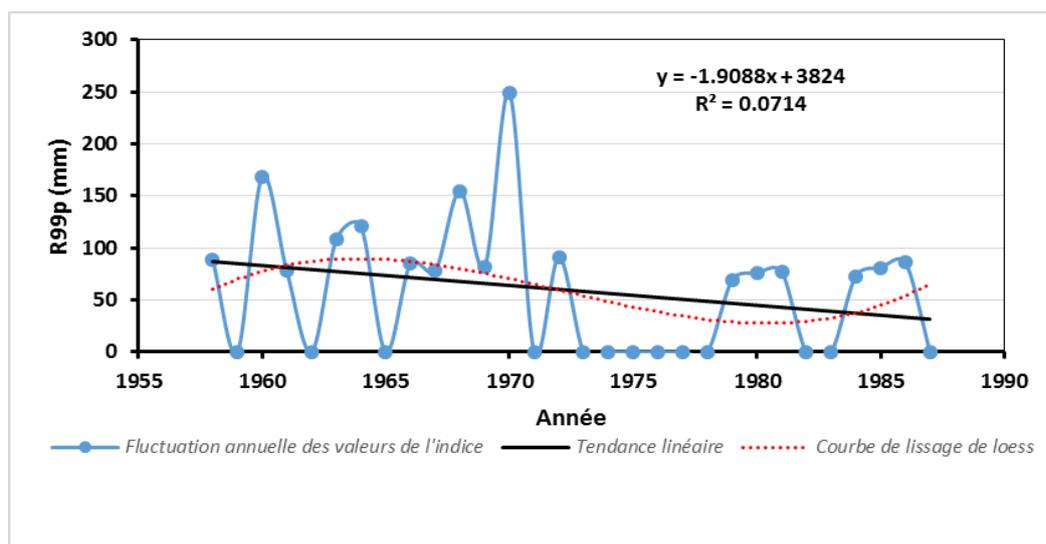
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 26: Indice de jour très humide (R95p) (1988-2017)



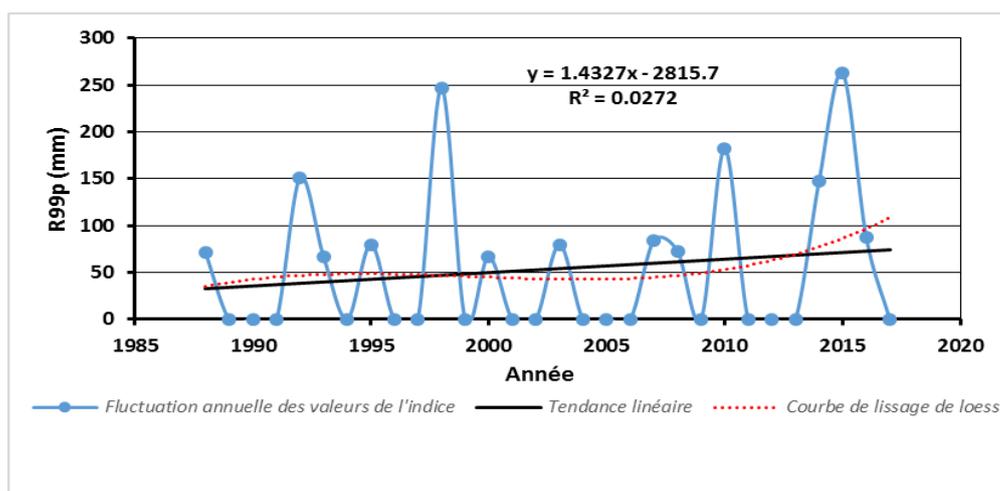
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 27: Indice de jour extrêmement humide (R99p) (1958-1987)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 28: Indice de jour extrêmement humide (R99p) (1988-2017)



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

4.2. Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières bassins versant du Kou

4.2.1. Vérification des hypothèses de base dans les hauteurs de pluie maximales

Le Tableau 11, montre les résultats des tests statistiques appliqués aux pluviométries maximales dans les quatre (4) stations du bassin versant du Kou. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz (1943). Le test de Man-Kendal (1975) a permis de faire le test de stationnarité et le test de Wilcoxon (1945) a servi au test d'homogénéité. L'analyse des données, permet de constater qu'à un niveau de signification de 5%, l'ensemble des stations obéit aux exigences de l'analyse fréquentielle.

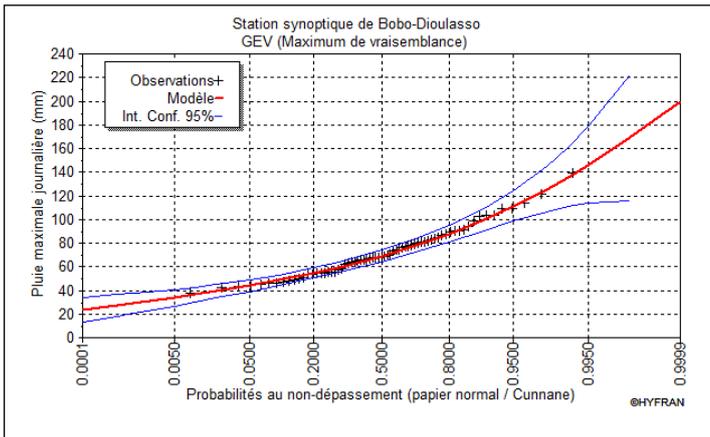
Tableau 11 : Résultats des tests statistiques appliqués aux pluies maximales

Station	Teste d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
	U	P	K (seuil)	P	W (seuil)	P
	Station pluviométriques					
Bobo	1,15	0,252	2,48	0,0131	1,94	0,0518
Farakoba	0.263	0.793	0.0565	0.955	0.631	0.528
Nasso	0.874	0.382	0.416	0.678	0.226	0.821
Vallée du Kou	0.0767	0.939	0.168	0.866	0.0652	0.948

4.2.2. Ajustement aux lois des séries pluviométriques maximales

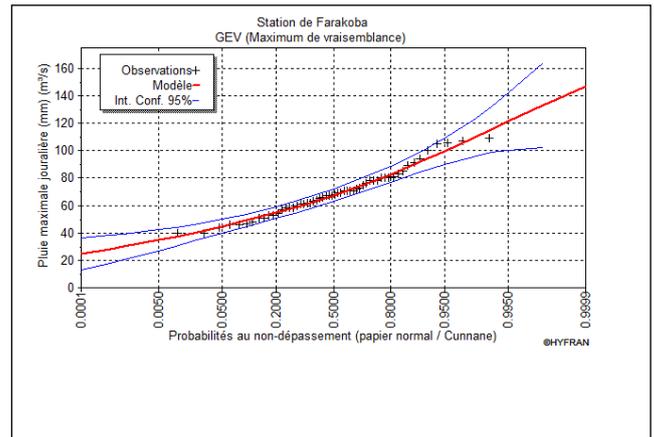
De l'analyse de la figure, il ressort que toutes les séries pluviométriques s'ajustent bien à la loi GEV avec une marge d'erreur de 1 à 5 %.

Figure 29 : Ajustement de la loi GEV sur la station synoptique de Bobo Dioulasso



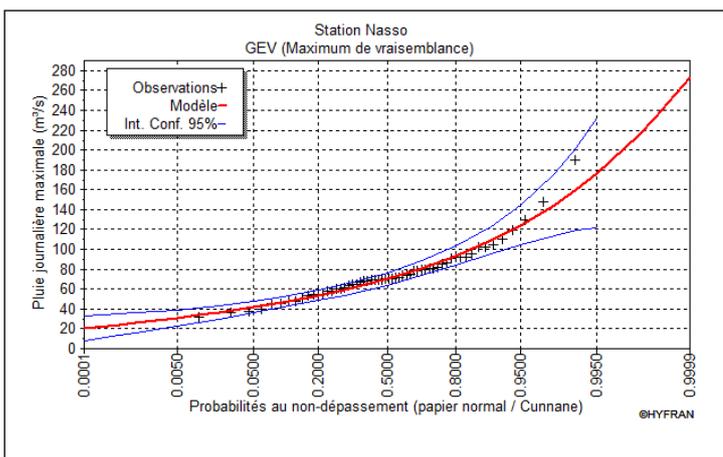
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 30 : Ajustement de la loi GEV sur la station de Farakoba



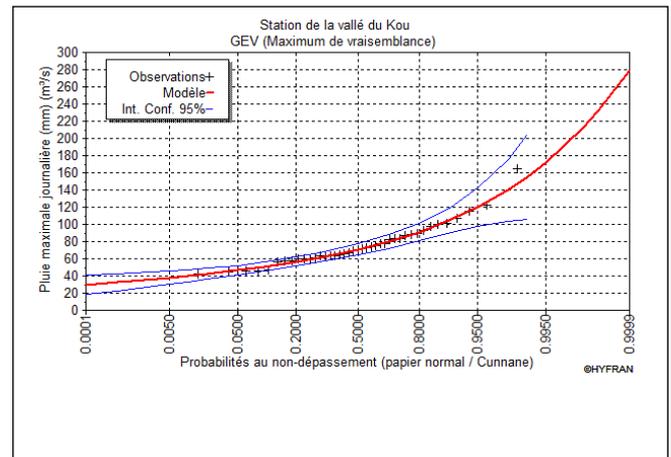
Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 31 : Ajustement de la loi GEV sur la station de Nasso



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

Figure 32 : Ajustement de la loi GEV sur la station de la vallée du Kou



Source : D'après les données de l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), 2018

L'ajustement des pluies journalières aux tests statistiques a permis d'obtenir les quantiles estimés pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100ans). Les intervalles de

confiance qui permettent d'évaluer l'incertitude associée aux estimations sont aussi fournis (tableau 12).

Tableau 12 : Périodes de retour des pluies maximales estimées dans le bassin versant du Kou

Station	2ans	5ans	10ans	20ans	50ans	100ans
Bobo	69 [64-74]	87,8 [80-94]	99,9 [90-109]	111 [98-124]	126 [106-145]	136 [111-161]
Farakoba	67 [62-72]	82 [76-88]	91 [84-99]	99 [90-109]	109 [95-122]	115 [98-132]
Nasso	70 [63-76]	93 [83-103]	109 [95-123]	125 [105-144]	145 [114-176]	161 [119-232]
Vallée du Kou	70 [64-77]	91 [80-101]	105 [90-120]	120 [97-142]	140 [104-175]	155 [106-205]

De l'analyse du tableau 12, il ressort que les pluies journalières ayant des hauteurs comprises entre 62 mm et 77 mm ont une chance sur deux de se produire tous les deux ans dans le bassin. Les hauteurs pluviométriques journalières contenues entre l'intervalle de 76 mm et 103 mm ont une probabilité d'apparition de 20 % tous les 5 ans. Les pluies journalières dont les hauteurs sont comprises entre 84 et 123 mm surviennent tous les 10 ans avec 10 % de probabilité de survenance, mais les pluies ayant 5 %, 2 % et 1% de chance de survenir sont des pluies dont les hauteurs pluviométriques journalières sont respectivement comprises entre 90 mm et 144 mm, 95 mm et 176 mm, 98 et 205 mm, avec une période de retour de 20, 50 et 100 ans.

Les résultats obtenus de l'analyse fréquentielle et de la détermination de la moyenne maximale pluviométrique journalière permettent de conclure que les pluies maximales journalières annuelles engendrent des inondations pluviales récurrentes qui s'accompagne d'une perte en terre dans le bassin versant du Kou.

La connaissance de ces paramètres est nécessaire pour pouvoir faire face aux risques que peuvent engendrer les inondations dans le bassin versant du Kou et d'élaborer les outils permettant aux décideurs de mieux gérer ces situations (Valencia D. 2006).

l'évolution des indices pluviométriques au cours des 60 ans d'observation montre qu'au niveau du bassin versant du Kou, le total annuel des pluies (PRCPTOT) et les jours humides consécutifs (CWD) ont connu une baisse tandis que les jours secs consécutifs (CDD), la

hauteur maximale des précipitations d'un jour (Rx1day), le cumul maximal des précipitations de 5 jours (Rx5day), les jours très pluvieux (R95) et les jours extrêmement pluvieux (R99p) ont connu une hausse.

4.3. Dynamique d'occupation des sols dans le processus érosif du bassin versant du kou

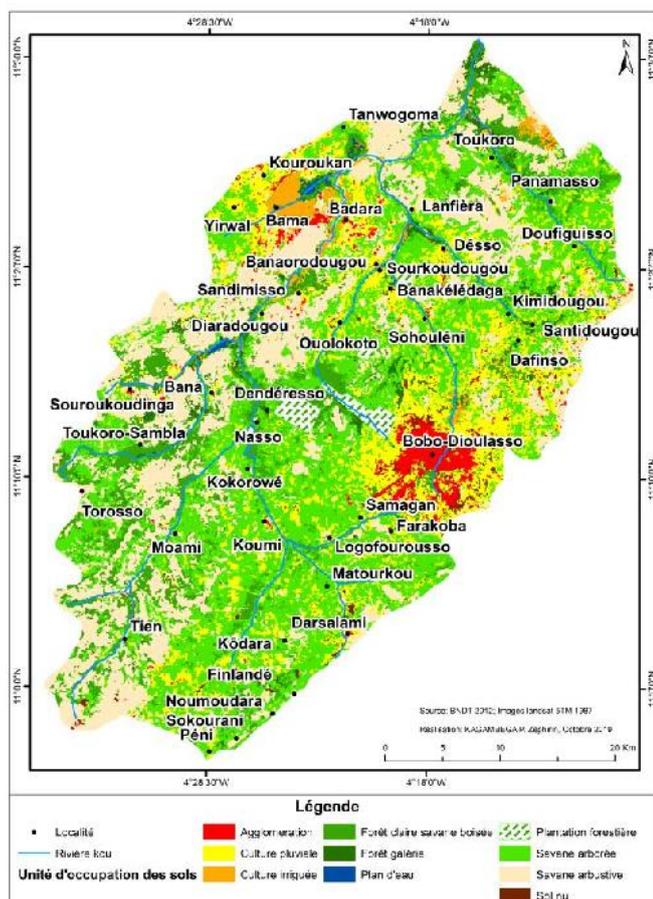
Cette partie analyse des états de l'occupation des sols du bassin versant du Kou en 1987, 2002 et 2017 à travers l'interprétation des images satellitaires Landsat. Il traite également des changements observés entre ces trois dates au sein des unités d'occupation du sol.

4.3.1. Etats de l'occupation des sols en 1987, 2002 et 2017

4.3.1.1. Occupation des sols en 1987

La carte 15 présente l'occupation des sols du bassin versant du Kou en 1987

Carte 15 : Occupation des sols du bassin versant du Kou en 1987

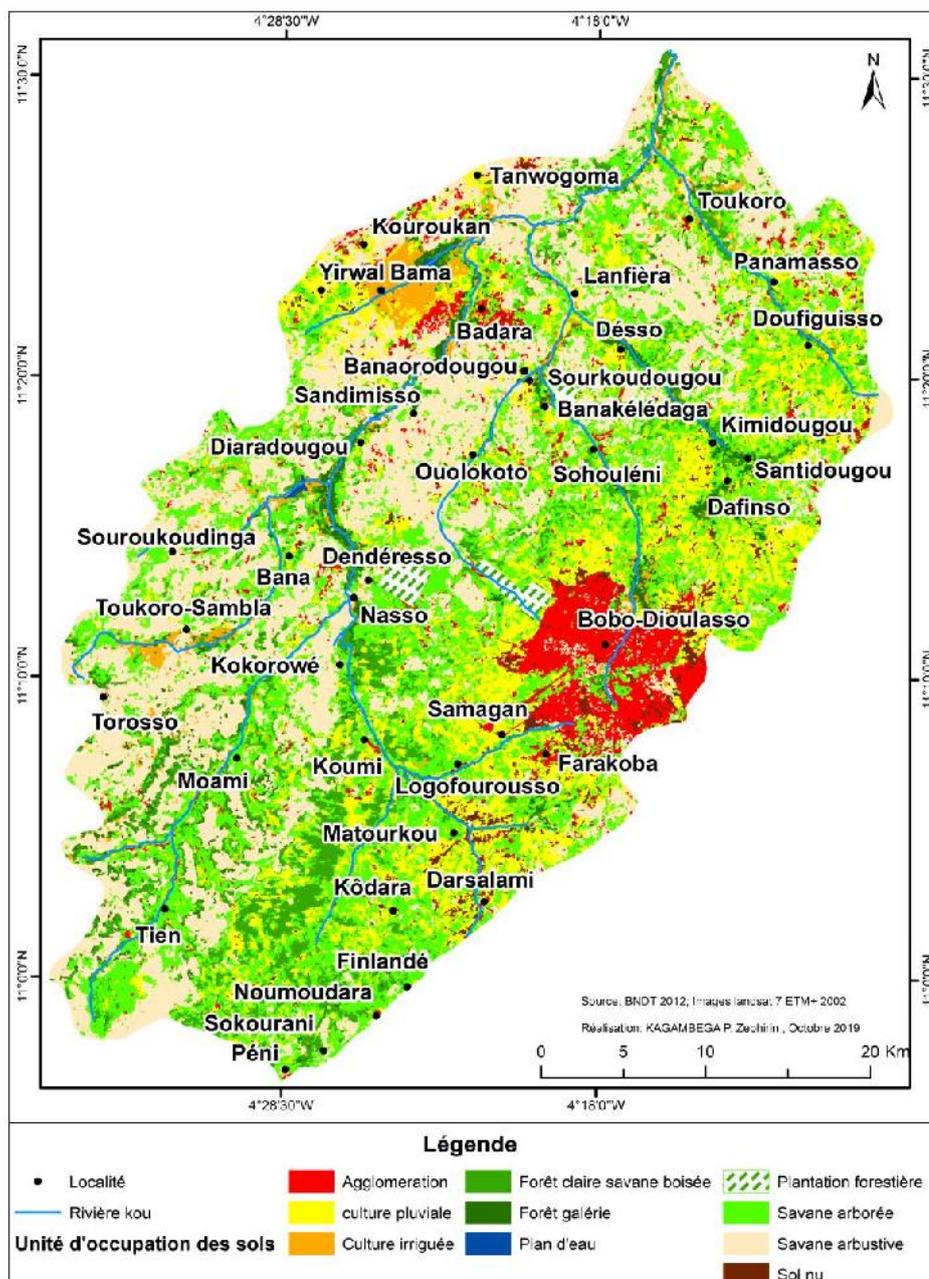


Les unités d'occupation des sols identifiées en 1987 sont composées de forêt galerie (44365 ha), forêt claire et savane boisée (18737 ha), savane arborée (64419 ha), savane arbustive (47086 ha), culture pluviale (31341 ha), culture irriguée (3891 ha), sol nu (1203 ha), plantation forestière (2148 ha), plan d'eau (319 ha), agglomération (5136 ha).

4.3.1.2. Occupation des sols en 2002

La carte 16 présente l'occupation des sols du bassin versant du Kou en 2002.

Carte 16 : Occupation des sols du bassin versant du Kou en 2002

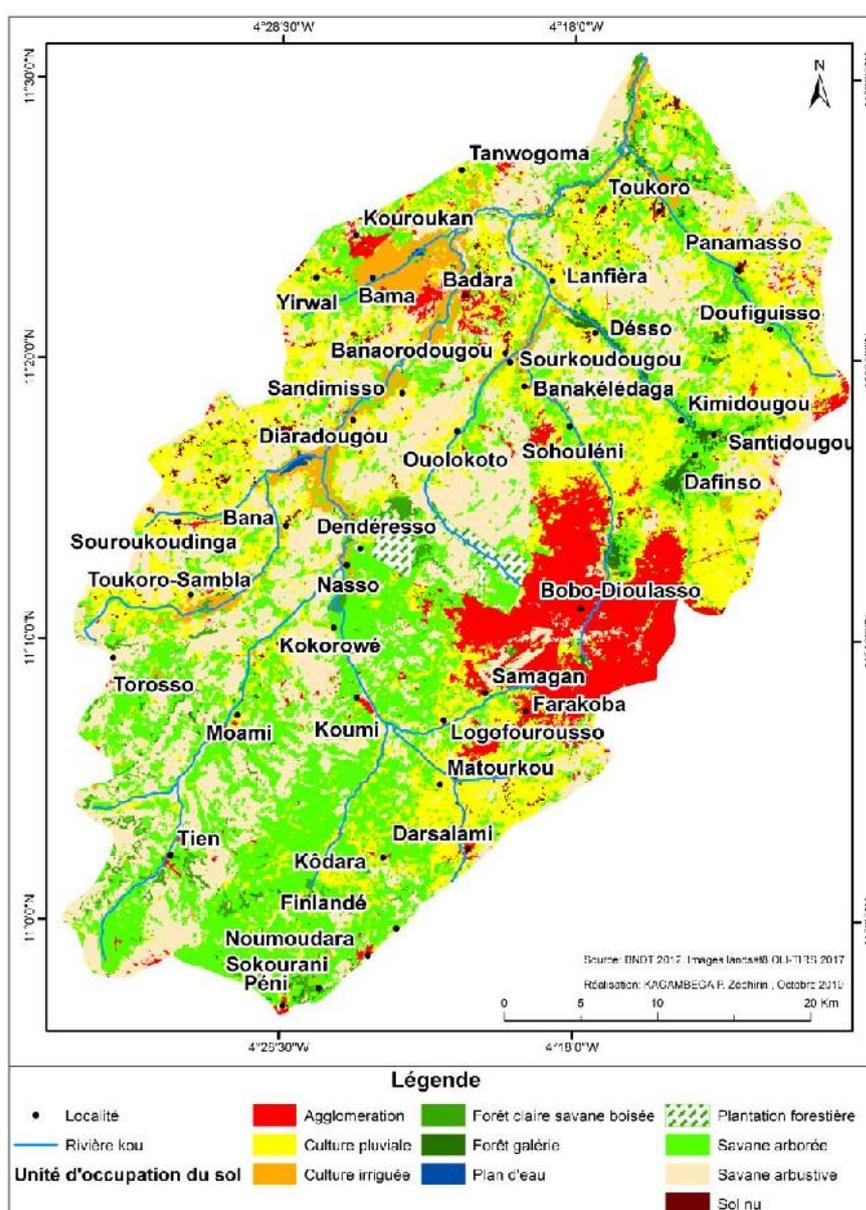


En 200, les unités qui composaient l'occupation des sols dans le bassin versant du Kou comprenait : la forêt galerie (4631 ha), forêt claire et savane boisée (14483 ha), savane arborée (55635 ha), savane arbustive (55729 ha), culture pluviale (31880 ha), culture irriguée (5016 ha), sol nu (2803 ha), plantation forestière (1339 ha), plan d'eau (149 ha), agglomération (9983 ha).

4.3.1.3. Occupation des sols en 2017

La carte 17 présente l'occupation des sols du bassin versant du Kou en 2017

Carte 17 : Occupation des sols du bassin versant du Kou en 2017



Les unités d'occupation des sols en 2017 étaient composées de : la forêt galerie (2245 ha), forêt claire et savane boisée (2529 ha), savane arborée (52403 ha), savane arbustive (52140 ha), culture pluviale (46183 ha), culture irriguée (7293 ha), sol nu (1252 ha), plantation forestière (1788 ha), plan d'eau (161 ha), agglomération (15651 ha).

4.3.2. Changement des unités d'occupation des sols

Pour mesurer les changements des unités d'occupation des sols dans les différents intervalles de temps (1987-2002 et 2006-2013), les taux moyens annuels d'expansion spatiale ont été calculés à partir des superficies des unités.

4.3.2.1. Changement entre 1987 et 2002

4.3.2.1.1. Superficies et taux moyen d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols

Le tableau 13 présente les superficies et le taux moyen annuel d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002.

Tableau 13 : Superficie et taux moyen d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols (1987-2002)

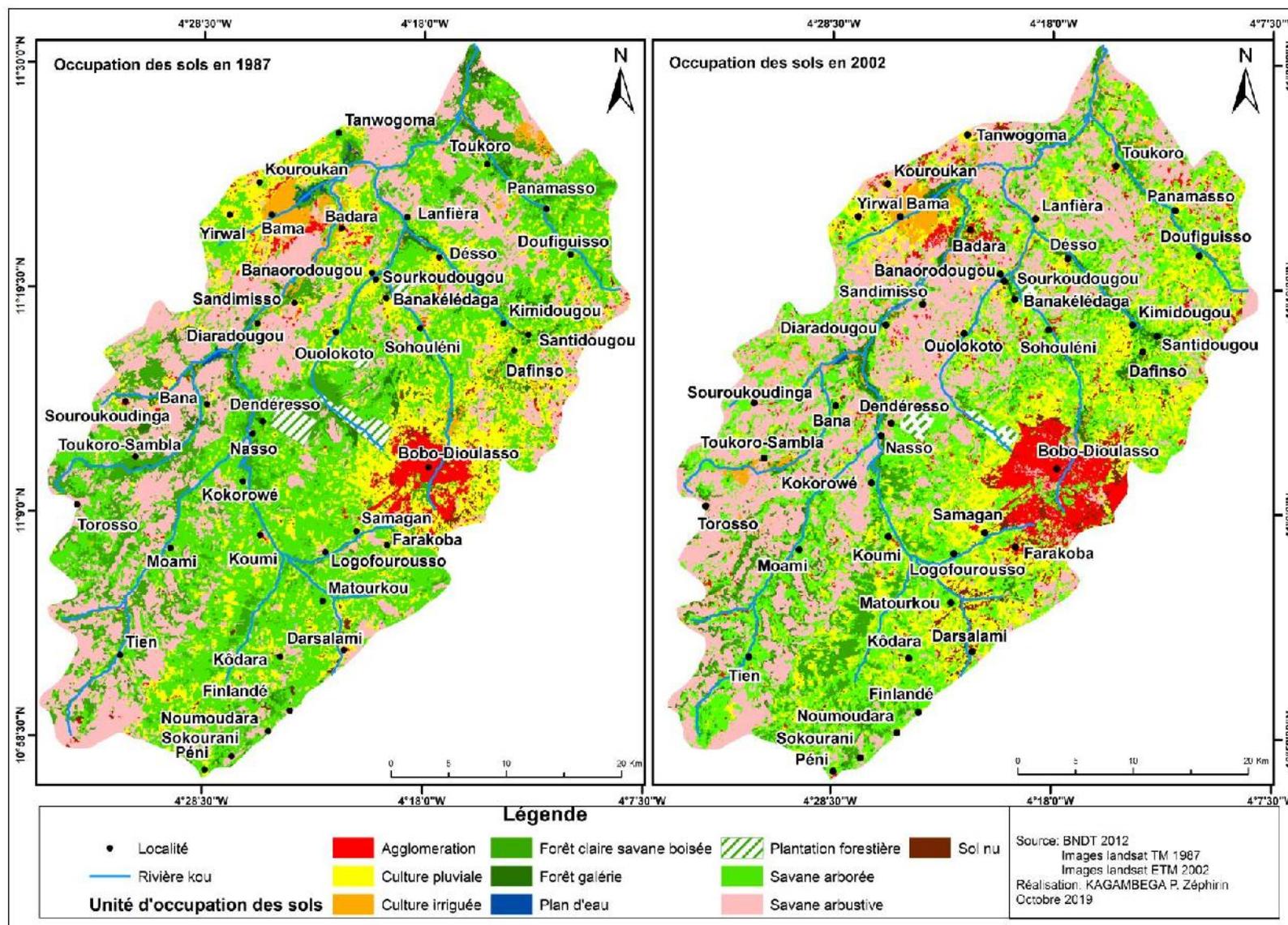
Unité d'occupation des sols	Années		Taux moyen annuelle d'expansion spatiale T en (%)
	1987 (t1) Superficie (S1) (ha)	2002 (t2) Superficie (S2) (ha)	
FG	4365	4631	0,14
FCSB	18737	14483	-0,63
SA	67419	55635	-0,47
Sa	47086	55729	0,41
CP	31341	31880	0,04
CI	3891	5016	0,62
SN	1203	2803	2,07
PF	2148	1339	-1,15
PE	319	149	-0,01
AG	5136	9983	1,62
Total	181651	181651	

FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

Les résultats du tableau 13 traduisent les taux moyens annuels d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols du bassin versant du Kou entre 1987 et 2002. Globalement, les valeurs positives du taux indiquent que la forêt galerie (0,14 %), la savane arbustive (0,41 %), les cultures pluviales (0,04 %), les cultures irriguées (0,62 %), les sols nu (2,07 %) et les agglomérations (1,62 %) ont connu une augmentation de leurs superficies, tandis que, les valeurs négatives expriment la diminution des superficies des forêts claires et savanes boisées (-0,63 %), de la savane arborée (-0,47 %), de la plantation forestière (-1,15) ainsi que les plan d'eau (-0,01 %).

La carte 18 illustre la dynamique de cette expansion de l'occupation des sols.

Carte 18 : Dynamique d'occupation des sols entre 1987 et 2002



5.3.2.1.2. Matrice de transition des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002

Le tableau 14 présente à travers la matrice de transition les changements opérés dans les unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002.

Tableau 14 : Matrice de transition des unités d'occupation des sols (1987 et 2002)

OCCUPATION DU SOL EN 1987	OCCUPATION DU SOL EN 2002										Total 1987 (ha)
	FG	FCSB	SA	Sa	CP	CI	SN	PF	PE	AG	
FG	3598	0	0	0	538	340	12	0	0	0	4488
FCSB	0	6560	5576	5387	1253	0	0	0	0	147	18923
SA	0	0	36395	13904	15494	0	571	4	0	1215	67583
SA	0	0	0	41920	3267	0	260	0	0	1392	46839
CP	0	0	0	6759	25779	260	1535	4	0	3503	31081
CI	0	0	0	0	487	3349	12	0	0	42	3890
SN	0	0	0	0	227	8	566	0	0	357	1158
PF	0	0	0	0	130	12	0	1941	0	54	2137
PE	0	0	0	0	0	84	0	0	234	0	318
AG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5136	5136
TOTAL 2002 (HA)	3598	6560	41971	67970	47175	4053	2956	1949	234	11846	181553

FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PF** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

L'analyse de cette matrice permet de quantifier la dynamique de chaque unité d'occupation des sols dans le bassin versant du Kou. Entre 1987 et 2002 ; 538 ha de forêt galerie se sont transformés en champs (régression) ; 340 ha en cultures irriguées (régression) et 12 ha en sols nu (régression). Dans le même temps 3598 ha de cette unité sont restés inchangés (stabilité).

Les forêts claires et savanes boisées ont elles aussi connu une transformation selon différentes proportions vers d'autres unités : 6560 ha de cette unité sont restés inchangés (stabilité) par contre 5576 ha se sont transformés en savane arborée (régression); 5387 en savane arbustive (régression) ; 1253 ha en culture pluviale et 147 ha en agglomération (régression).

Au sein de l'unité d'occupation de la savane arborée, 36395 ha sont restés stable entre 1987 et 2002 ; 13904 ha se sont transformés en savane arbustive (régression) ; 15494 en culture pluviale (régression) ; 571 ha en sol nu (régression) et 1215 ha en agglomération (régression).

Ces données de la matrice de transition traduisent au niveau des unités d'occupation du sol, la progression, la régression, et la stabilité de ces dernières.

De ce fait, cette matrice a permis de dégager deux changements majeurs:

- la dégradation des formations forestières, marquée par une réduction des superficies des forêts claires et savane boisées, les plantations forestières ainsi que la savane arborée
- l'augmentation en superficie des zones de culture, des sols nus ainsi que l'agglomération

4.3.2.1.3. Conversion des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002

Le tableau 15 montre le taux de conversion des unités d'occupation des sols dans le bassin versant du Kou entre 1987 et 2002

Tableau 15 : Taux de conversion des unités d'occupations entre 1987 et 2002

Unité d'occupation des sols	Années		Taux de conversion Tc des unités d'occupation des sols (%)
	1987 (t1) Superficie (Sit) (ha)	2002 (t2) Superficie stable (Sis) (ha)	
FG	4365	3598	17,57
FCSB	18737	6560	64,98
SA	67419	36395	46,01
Sa	47086	41920	10,97
CP	31341	25779	17,74
CI	3891	3349	13,92
SN	1203	566	52,95
PF	2148	1941	9,63
PE	319	234	26,64
AG	5136	5136	0
Total	181651		

FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

L'analyse du tableau 15 montre qu'entre 1987 et 2002, les taux de conversion les plus élevés sont observés dans les unités suivantes : forêt claire et savane boisée (64,98 %), sol nu (52,95 %), savane arborée (46,01 %). Par contre les taux de conversion les plus faibles sont obtenus dans l'agglomération (0 %) et les plantations forestière (9,63 %).

4.3.2.2. Changement entre 2002 et 2017

5.3.2.2.1. Superficies et taux moyen annuel d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols

Le tableau 16 présente les superficies et les taux moyens annuels d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols dans le bassin versant du Kou.

Tableau 16 : Superficies et taux moyens annuels d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols (2002 – 2017)

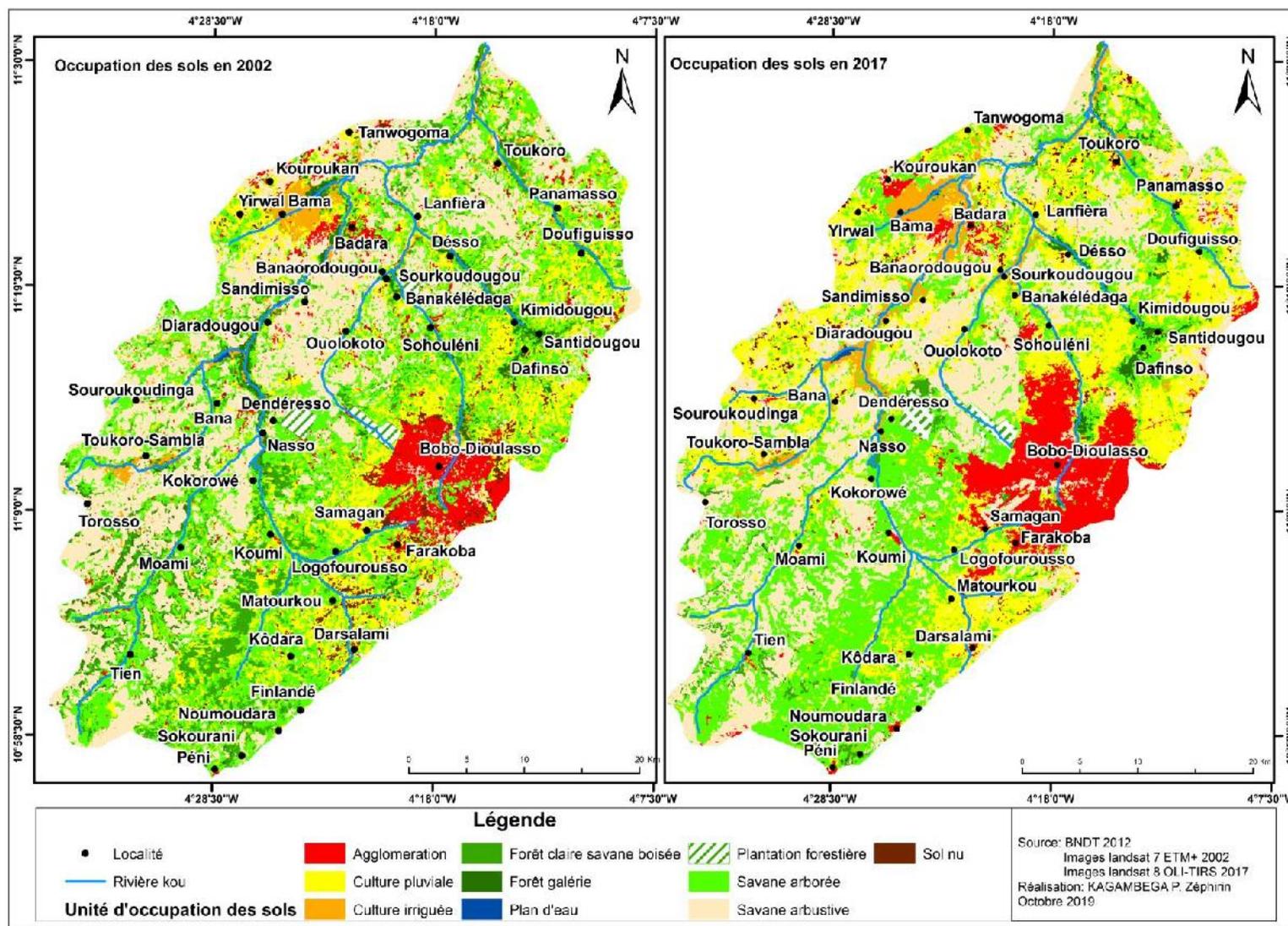
Unité d'occupation des sols	Années		Taux moyen annuel d'expansion spatiale T en (%)
	2002 (t1) Superficie (S1) (ha)	2017(t2) Superficie (S2) (ha)	
FG	4631	2245	-0,01
FCSB	14483	2529	-4,28
SA	55635	52403	-0,14
Sa	55729	52140	-0,16
CP	31880	46183	0,90
CI	5016	7293	0,91
SN	2803	1252	-1,97
PF	1339	1788	0,70
PE	149	161	0,18
AG	9983	15651	1,10
Total	181651	181651	

FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

Les résultats du tableau 16 traduisent les taux moyens annuels d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols du bassin versant du Kou. Globalement, les valeurs positives du taux indiquent que les cultures pluviales (0,90 %), les cultures irriguées (0,91 %), les plantations forestières (0,70 %) et les agglomérations (1,10 %) ont connu une augmentation de leurs superficies, tandis que, les valeurs négatives expriment la diminution des superficies des forêts galeries (-0,01) des forêts claires et savanes boisées (-4,28 %), de la savane arborée (-0,14 %), de la savane arbustive (-0,16) ainsi que les sols nu (-1,97 %).

La carte 19 illustre la dynamique de cette expansion de l'occupation des sols

Carte 19 : Dynamique d'occupation des sols entre 2002 et 2017



4.3.2.2.2. Matrice de transition des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017

Le tableau 17 présente à travers la matrice de transition les changements opérés dans les unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017.

Tableau 17 : Matrice de transition des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017

OCCUPATION DU SOL EN 2002	OCCUPATION DU SOL EN 2017										Total 2002 (ha)
	FG	FCSB	SA	Sa	CP	CI	SN	PF	PE	AG	
FG	2819	0	0	0	185	1568	0	0	0	0	4572
FCSB	0	1226	8752	2048	1442	912	0	0	0	71	14451
SA	0	0	23735	12899	15094	958	248	264	0	2519	55717
SA	0	0	0	40769	11288	1114	471	147	0	2006	55795
CP	0	0	0	0	27822	538	323	0	0	3112	31795
CI	0	0	0	0	0	4927	33	16	0	16	4992
SN	0	0	0	0	1131	0	592	0	0	1064	2787
PF	0	0	0	16	75	4	0	1239	0	0	1334
PE	0	0	0	0	0	0	0	0	141	0	141
AG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9962	9962
TOTAL 2017 (HA)	2819	1226	32487	55732	57037	10021	1667	1666	141	18750	181546

FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

L'analyse du tableau 17 permet de quantifier la dynamique de chaque unité d'occupation des sols dans le bassin versant du Kou. Ainsi, entre 2002 et 2017 ; 185 ha de forêt galerie se sont transformés en champs (régression) et 1568 ha en cultures irriguées (régression). Dans le même temps 2819 ha de cette unité sont restés inchangés (stabilité).

Les forêts claires et savanes boisées ont elles aussi connu une transformation selon différentes proportions vers d'autres unités : 1226 ha de cette unité sont restés inchangés (stabilité) par contre 8752 ha se sont transformés en savane arborée (régression); 2048 en savane arbustive (régression) ; 1412 ha en culture pluviale et 912 ha en culture irriguée (régression) et 71 ha en zone d'habitation.

Au sein de l'unité d'occupation de la savane arborée, 23735 ha sont restés stable entre 1987 et 2002 ; 12899 ha se sont transformés en savane arbustive (régression) ; 15094 en culture pluviale (régression) ; 958 ha en culture irrigué ; 248 ha en sol nu (régression) ; 264 en plantation forestière (régression) et 2519 ha en zone d'habitation (régression).

Ces données de la matrice de transition traduisent au niveau des unités d'occupation du sol, la progression, la régression, et la stabilité de ces dernières.

De ce fait, cette matrice a permis de dégager deux changements majeurs:

- la dégradation des formations forestières, marquée par une réduction des superficies des forêts claires et savane boisées, les plantations forestières ainsi que la savane arborée
- l'augmentation en superficie des zones de culture et des zones d'habitations.

4.3.2.2.3. Conversion des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017

Le tableau 18 montre le taux de conversion des unités d'occupation des sols dans le bassin versant du Kou entre 2002 et 2017

Tableaux 18 : Taux de conversion des unités d'occupations entre 2002 et 2017

Unité d'occupation des sols	Années		Taux de conversion Tc des unités d'occupation des sols (%)
	2002 (t1) Superficie (Sit) (ha)	20017 (t2) Superficie stable (Sis) (ha)	
FG	4631	2819	39,12
FCSB	14483	1226	91,53
SA	55635	23735	57,33
Sa	55729	40769	26,84
CP	31880	27822	12,72
CI	5016	4927	1,77
SN	2803	592	78,87
PF	1339	1239	7,46
PE	149	141	5,36
AG	9983	9962	0,21
Total	181651		

FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CP** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

L'analyse du tableau 18 montre qu'entre 2002 et 2017, les taux de conversion les plus élevés sont observés dans les unités suivantes : forêt claire et savane boisée (91,53 %), sol nu (78,87 %), savane arborée (57,33 %). Par contre les taux de conversion les plus faibles sont obtenus dans l'agglomération (0,21 %) et les cultures irrigués (1,77 %).

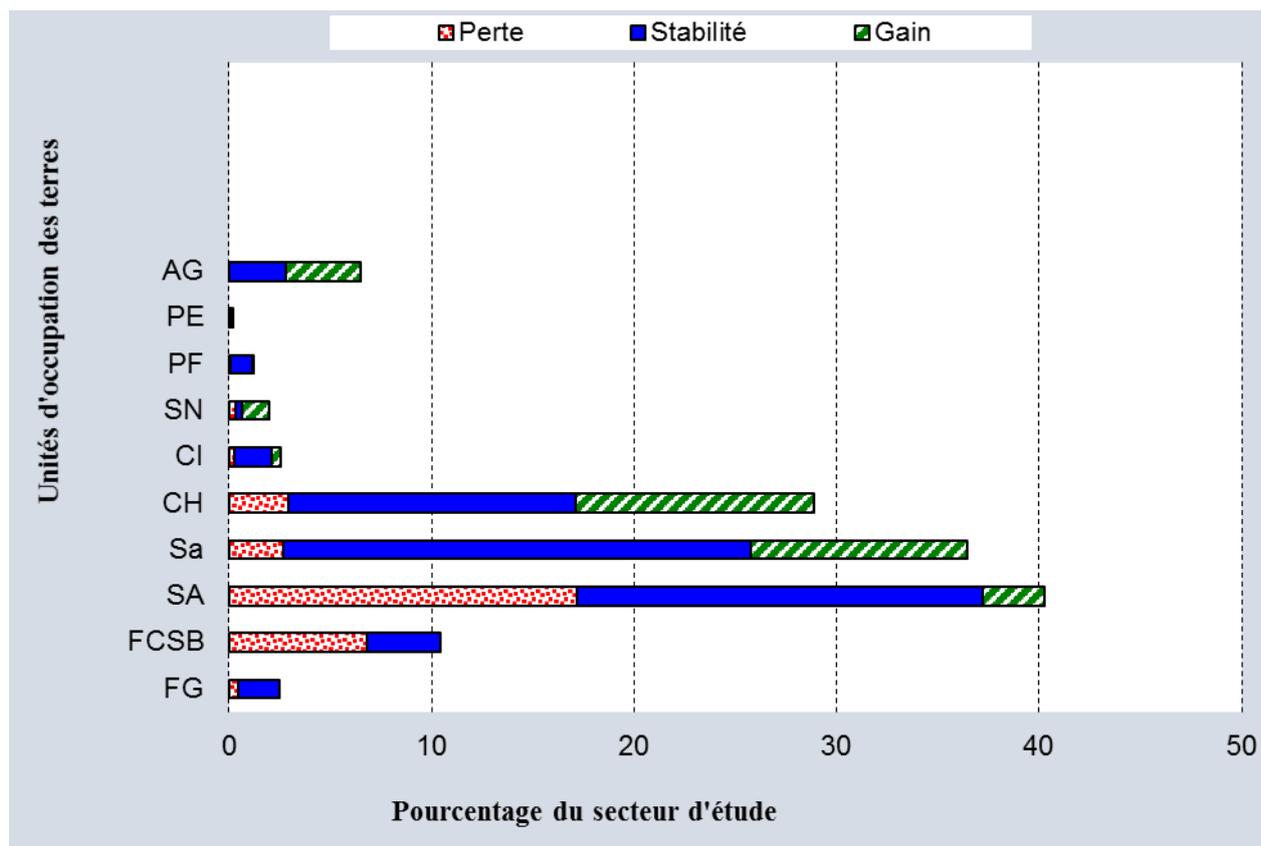
Au cours des 25 dernières années, l'expansion agricole s'est développée au détriment des formations végétales naturelles. Une partie des formations naturelles, ont connu des changements et des transformations : certaines ont été transformées en vergers ou plantations, voire en agglomérations, plans d'eau ou autres formes d'occupation ; d'autres territoires agricoles après une longue jachère ont été transformés en savanes. L'extension du domaine agricole dans le bassin versant est principalement liée au développement des cultures de rentes essentiellement le coton, le sésame et les arachides.

4.3.2.2.4. Intensités des changements par intervalle de temps, unités d'occupation des terres et transition des unités d'occupation des sols (1987-2002 et 2002-1987)

4.3.2.2.4.1. Intensité de changements par unité d'occupation des sols entre 1987 et 2002

La figure 33 présente l'intensité de changement entre les unités d'occupation des sols et celle à l'intérieur de chaque unité dans la période de 1987 à 2002.

Figure 33 : Intensité des changements opérés par catégorie d'occupation des sols entre 1987 et 2002



FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CH** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PF** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

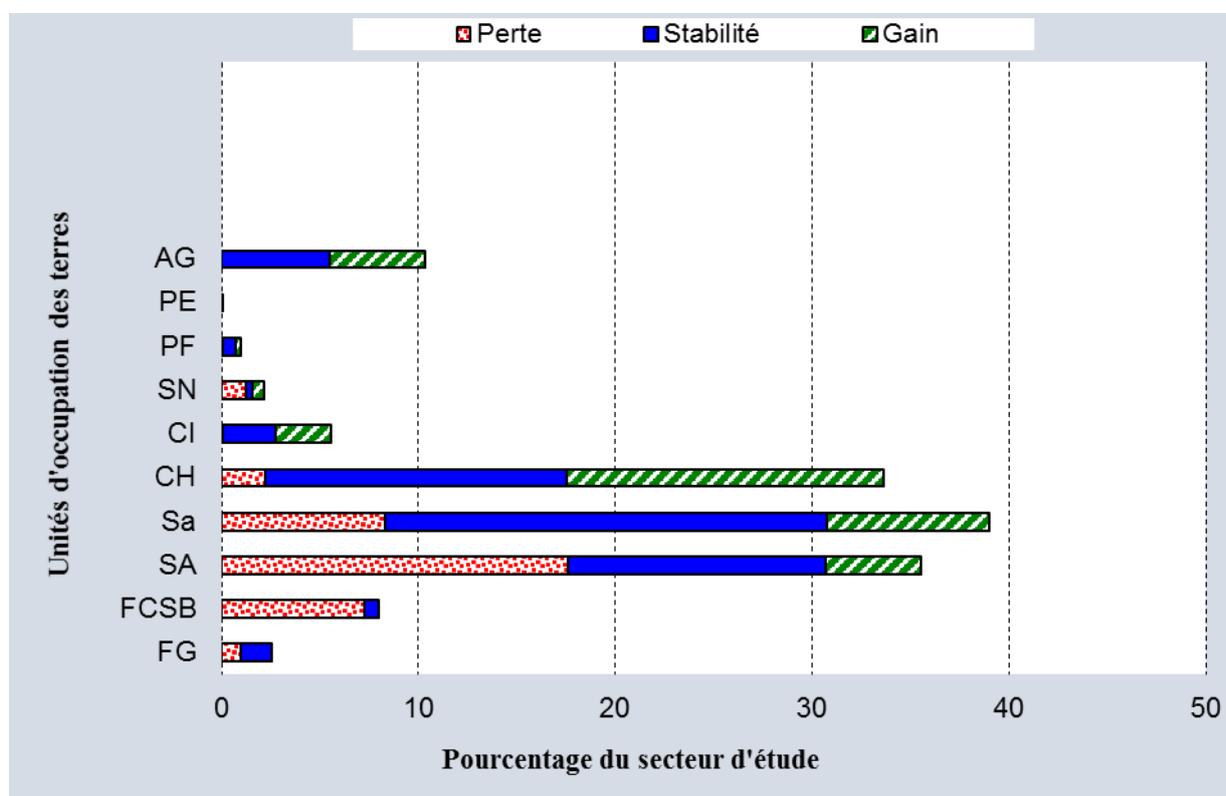
Il ressort de l'analyse de la figure 33, que globalement, les changements entre les unités d'occupation des terres se sont opérés dans le secteur d'étude de façon différentielle sur le plan spatial. Dans chaque cas on a pu observer des zones de perte, de résistance ou stabilité et de gain occupant chacune des proportions différentes du secteur d'étude. Ainsi, les savanes arborées sont les catégories où les changements ont été les plus significatifs sur environ 40 % du secteur d'étude avec 18% de pertes contre 3% de gains et 19% de stabilité. Elles sont suivies des savanes arbustives sur 37% du secteur d'étude avec 3% de pertes contre 11% de gains et 23% de stabilité. Viennent ensuite les cultures pluviales sur 28% du secteur avec 3% de pertes contre 11% de gains et 14% de stabilité. Les forêts claires et les savanes boisées sur 10% du secteur sont caractérisées par 7% de pertes et 3% de stabilité. Les agglomérations sur 7% du secteur, indiquent 4% de gain et 3% de stabilité. Les forêts galerie sur 3% donnent 1% de perte et 2% de stabilité ; les cultures irriguées sur 3,5% du secteur d'étude ont connu 0,5% de gain et 3% de stabilité. Pour les sols nus, avec 2% du secteur

d'étude ils ont connu une évolution avec 0,5% de perte, 1% de gain et 0,5% de stabilité et enfin les plantations forestières sur 0,25% de la surface d'étude sont restées stable.

4.3.2.2.4.2. Intensité des changements par catégorie d'occupation des sols entre 2002 et 2017

La figure 34 présente l'intensité de changement au niveau de chaque unité d'occupation des sols pour l'intervalle de temps 2002 – 2017.

Figure 34 : Intensité des changements opérés par catégorie d'occupation des sols entre 2002 et 2017



FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CH** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PE** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

L'analyse de la figure 34 montre que les changements entre les unités d'occupation des sols se sont opérés dans le secteur d'étude de façon différentielle sur le plan spatial.

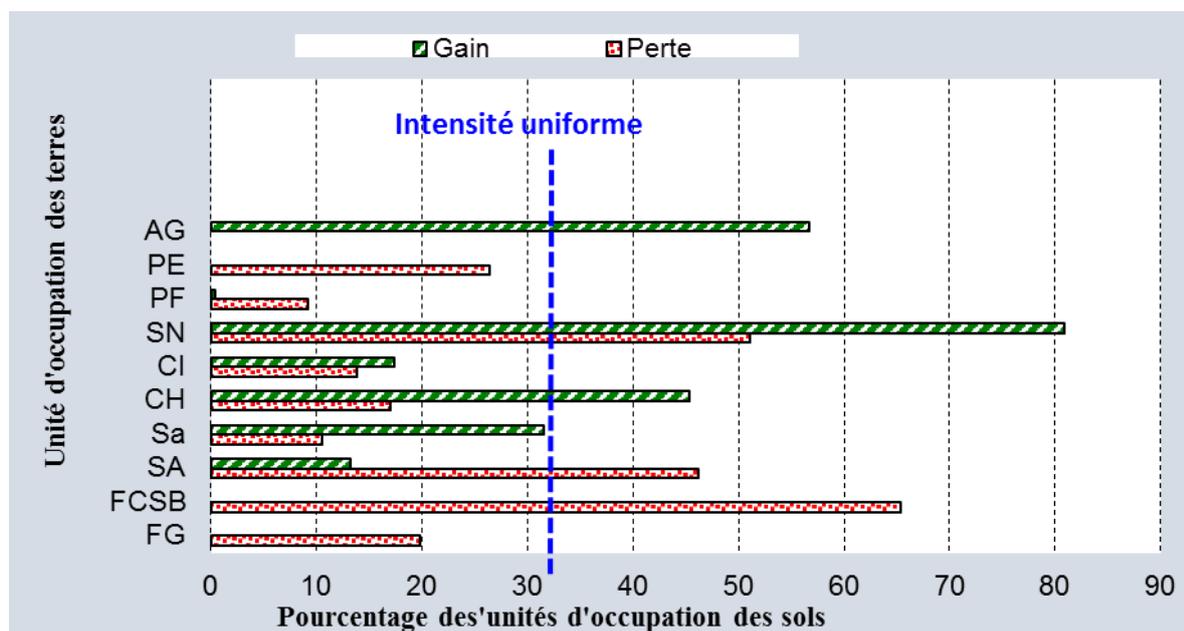
Dans chaque unité, des zones de perte, de stabilité et de gain ont été observées et occupent chacune des proportions différentes du secteur d'étude. Ainsi, les savanes arbustives sont les catégories où les changements ont été les plus significatifs sur environ 38 % du secteur d'étude avec 8% de pertes contre 6% de gains et 30% de stabilité. Elles sont suivies des savanes arborées sur 35% du secteur d'étude avec 18% de pertes contre 3% de gains et

14% de stabilité. Viennent ensuite les cultures pluviales sur 33% du secteur avec 3% de pertes contre 15% de gains et 15% de stabilité. Les agglomérations sur 10% du secteur sont caractérisées par 4% de gain et 6% de stabilité. Les forêts claires et les savanes boisées sur 7% du secteur, indiquent 5% de perte et 2% de stabilité. Les cultures irriguées sur 5% du secteur d'étude ont connu 2,5% de gain et 2,5% de stabilité. Les forêts galerie sur 2% donnent 1% de perte et 2% de stabilité. Pour les sols nus, avec 2% du secteur d'étude ils ont connu une évolution avec 1,5% de perte et 0,5% de stabilité et enfin les plantations forestières sur 0,25% de la surface d'étude sont restées stable.

4.3.2.2.4.3. Intensités et vitesses des changements des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002

La figure 35 présente les intensités et les vitesses de changements à l'intérieur de chaque unité d'occupation des sols dans l'intervalle de temps 1987 – 2002.

Figure 35 : Intensités et vitesses de changement par catégorie d'occupation des sols entre 1987 et 2002



FG : Forêt galerie ; **FCSB :** Forêt claire et Savane boisée ; **SA :** Savane arborée ; **Sa :** Savane arbustive ; **CH :** Culture pluviale ; **CI :** Culture irriguée ; **SN :** Sol nu ; **PF :** Plantation forestière ; **PE :** Plan d'eau ; **AG :** Agglomération

L'analyse de la figure 35 montre que toutes les unités d'occupation des terres ont connu des changements sous forme de pertes et de gains par rapport au pourcentage des unités.

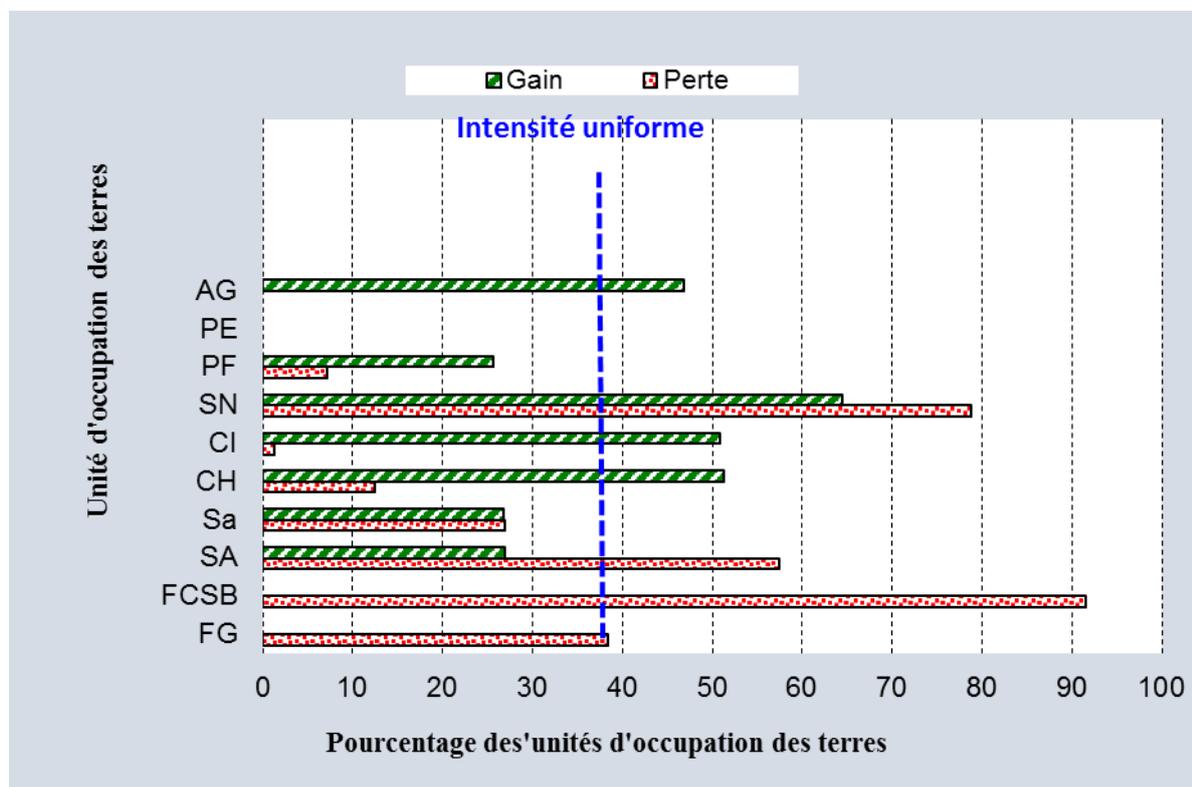
La ligne verticale bleue en tirets est le seuil où les changements restent uniformes si les perturbations s'arrêtent dans le secteur d'étude. A gauche de cette ligne, les changements sont dits dormants ou lents tandis qu'à droite, les changements sont qualifiés d'actifs ou rapides.

Ainsi, les changements opérés au niveau des différentes unités d'occupation des sols du secteur d'étude sont presque tous actifs ou rapides. Dans l'intervalle de temps 1987-2002, ce sont les unités composées de sols nus qui ont eu la plus grande vitesse de changement du secteur d'étude avec des pertes de 52 % des unités d'occupation des sols et 80 % de gains. Viennent Les forêts claires et les savanes boisées avec 65% de perte, les savanes arborées avec 58% de perte et 28% de gain, les cultures pluviales avec 12% de perte et 52% de gain, les cultures irriguées avec 1% de perte et 51% de gain, les agglomérations avec 47% de gain, les forêts galerie 39% de perte, les savanes arbustives avec 27% de perte et 27% de gain. Enfin les plantations forestières ont connu 6% de perte et 26% de gain.

4.3.2.2.4.3. Intensités et vitesses des changements des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017

La figure 36 présente les intensités et les vitesses de changements à l'intérieur de chaque unité d'occupation des sols dans l'intervalle de temps 2002 – 2017.

Figure 36 : Intensités et vitesses de changement par catégorie d'occupation des sols entre 2002 et 2017



FG : Forêt galerie ; **FCSB** : Forêt claire et Savane boisée ; **SA** : Savane arborée ; **Sa** : Savane arbustive ; **CH** : Culture pluviale ; **CI** : Culture irriguée ; **SN** : Sol nu ; **PF** : Plantation forestière ; **PF** : Plan d'eau ; **AG** : Agglomération

La figure 36 montre que toutes les unités d'occupation des terres ont connu des changements sous forme de pertes et de gains par rapport au pourcentage des unités.

La ligne verticale bleue en tirets est le seuil où les changements restent uniformes si les perturbations s'arrêtent dans le secteur d'étude. A gauche de cette ligne, les changements sont dits dormants ou lents tandis qu'à droite, les changements sont qualifiés d'actifs ou rapides. Dans l'intervalle de temps 2002-2017, ce sont les unités composées des forêts claires et les savanes boisées qui ont eu la plus grande vitesse de changement du secteur d'étude avec 92% de perte. Viennent, les sols nus avec 79% de perte et 63% de gain, les savanes arborées avec 58% de perte et 28% de gain, les cultures pluviales avec 12% de perte et 52% de gain, les cultures irriguées avec 1% de perte et 51% de gain, les agglomérations avec 48% de gain, les forêts galerie 39% de perte, les savanes arbustives avec 28% de perte et 27% de gain. Enfin les plantations forestières ont connu 6% de perte et 25% de gain.

Les programmes "PontiusMatrix22" et "Intensity Analysis02" de Aldwaik et de Pontius ont abouti à la mesure des intensités des changements de l'occupation des sols (en %) et leurs vitesses sur les deux intervalles de temps (1987-2002 /2002-2017). Les résultats montrent une forte régression des formations naturelle et une augmentation de superficie de certaine unité comme les zones de culture, les zones d'habitation et les sols nus. Toutefois une telle dynamique de l'occupation des sols surtout dans un contexte de l'augmentation des pluies extrêmes ne peut qu'amplifier la dégradation de l'environnement et aussi de l'activité érosive avec une diminution des rendements agricole.

Conclusion partielle

Trois classes de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique se distinguent dans le bassin versant du Kou. Les zones à faible vulnérabilité couvrent 19,1 % du secteur d'étude, les zones à moyenne vulnérabilité 55,49 % et celles à forte vulnérabilité 24,69 %. Ainsi les classes moyennes et fortes intéressent-elles 80,18 % du bassin versant. Leur vulnérabilité est due, pour l'essentiel à l'évolution des extrêmes pluviométriques et à une forte pression anthropique qui provoque la réduction du couvert forestier au profit des cultures. En effet, l'évolution des indices pluviométriques au cours des 60 ans d'observation montre qu'au niveau du bassin

versant du Kou, le total annuel des pluies (PRCPTOT) et les jours humides consécutifs (CWD) ont connu une baisse tandis que les jours secs consécutifs (CDD), la hauteur maximale des précipitations d'un jour (Rx1day), le cumul maximal des précipitations de 5 jours (Rx5day), les jours très pluvieux (R95) et les jours extrêmement pluvieux (R99p) ont connu une hausse. Pour ce qui est de la pression anthropique, la mesure des intensités des changements de l'occupation des sols et leurs vitesses sur les deux intervalles de temps (1987-2002 /2002-2017) montrent une forte régression des formations naturelle et une augmentation de superficie de certaine unité comme les zones de culture, les zones d'habitation et les sols nus. Toutefois une telle dynamique de l'occupation des sols surtout dans un contexte de l'augmentation des pluies extrêmes ne peut qu'amplifier la dégradation de l'environnement et aussi de l'activité érosive avec une diminution des rendements agricoles.

TROISIEME PARTIE :

**EFFETS INDUITS DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LE
BASSIN VERSANT DU KOU ET STRATEGIE PAYSANNE DE
LUTTE.**

La troisième partie est consacrée aux effets induits de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou et les stratégies paysannes de lutte. Elle regroupe les chapitres 5 et 6. Le chapitre 5 présente les effets induits en se basant sur les enquêtes, des observations visuelles de terrain et une simulation de la production de sédiments par le modèle SWAT. Le chapitre 6 est une activité d'enquête sur la perception paysanne sur l'érosion hydrique, ses facteurs (variabilité climatique, occupation des sols) et la stratégie de lutte antiérosive du bassin versant.

CHAPITRE 5 :

EFFET INDUITS DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

En plus des agressivités pluviométriques de ces deux dernières années, les conditions biophysiques, les modes d'exploitation des ressources naturelles exposent davantage le bassin versant du Kou au phénomène de dégradation. Ce chapitre présente les effets induits de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou.

5.1. Impact de l'érosion sur le milieu physique

L'érosion hydrique est aujourd'hui une réalité dévastatrice dans le bassin versant du Kou. Elle s'observe à toutes les échelles et ses manifestations vont en s'aggravant. Le nombre de sources naturelles diminue progressivement et la rivière est menacée de disparition au regard de la dégradation prononcée des berges.

Les manifestations les plus visibles de ces effets sont perceptibles à tous les niveaux et inquiètent les populations. De leurs propos, on retiendra que :

- depuis quelques années, l'eau monte plus vite dans les cours d'eau après les pluies ;
- les puits qui jadis regorgeaient d'eau tarissent maintenant ;
- le nombre et la profondeur des ravines se sont accrues, empêchant la circulation ;
- les surfaces ensablées par les torrents deviennent de plus en plus vastes ;
- le lessivage et l'encroûtement des terres sont de plus en plus étendus ;
- la baisse des rendements des cultures est nette.

De nos observations, le pont de Nasso est ensablé et bouché en amont par des débris solides. On note aussi la présence de monticules à 100 m en aval. Sur les berges il existe des champs de maïs à moins de 100 m de lit de la rivière. Même si des mesures ont été déjà entreprises par le CLE-Kou avec l'accompagnement des directions régionaux en charge du développement rural à travers des arbres (palmier et manguier), beaucoup reste à faire au regard de l'ampleur du phénomène.

La rivière Kou au pont de Dinderesso est presque totalement bouchée en amont sur plus d'un kilomètre par toutes sortes de débris solides. Ce phénomène contraint la rivière à dévier de sa trajectoire et de s'épancher dans la forêt. Ce pont a ainsi perdu toutes ses fonctions en vue de

permettre l'écoulement de la rivière. Cette situation hypothèque la production de la campagne sèche des périmètres aménagés en aval du pont (plus de 3200ha).

A 500m en aval du pont de Dinderesso, les faibles écoulements ont entraîné des dépôts de sable dans le lit mineur. Cette sédimentation est à l'origine de la disparition de la rivière à 1 Km du pont. C'est pourquoi la rivière se transforme en mare. Cette situation entraîne des inondations dans le village de Sonsongona et paradoxalement une insuffisance d'eau à Bama. Si la tendance n'est pas inversée, il est fort probable qu'on assiste à une disparition totale des sources du fait des phénomènes d'ensablement et à la survenue de catastrophes naturelles de toutes natures : pénurie d'eau pour la zone, inondations, disparition totale de possibilités d'activités économiques et une vulnérabilité plus prononcée de milliers de personnes qui vivent directement de l'exploitation des ressources de ce Bassin comme l'eau de production au niveau du périmètre irrigué de Bama (1260 ha) mais aussi de nombreux producteurs tout au long du Kou.

Photo 1 : Ensablement de la rivière kou en amont du pont de Nasso



Auteur : COMPAORE N.F., 04-06-2014

Photo 2 : Mare artificielle créée par l'épandage des du Kou



Auteur : COMPAORE N.F., 04-06-2014

Le dégât causé par l'érosion hydrique des sols sur le milieu physique peut être situé en deux niveaux suivant les zones érodées et les zones de dépôts

5.1.1. Les dégâts en zones érodées

5.1.1.1. Dégradation du bilan hydrique

Il s'agit de l'effet le plus important. Une culture pluviale soumise à l'érosion voit son déficit hydrique s'accroître suite à la réduction de la pluie efficace. En effet une fraction importante de la pluie ruisselle et n'est plus utilisable par la plante. On assiste à la réduction du volume de sol exploitable pour les racines et donc de la réserve utile du sol. Le départ du sol prive, dans ce cas, la culture d'une réserve en eau indispensable.

5.1.1.2. Appauvrissement du sol

L'appauvrissement du sol est lié au double effet de décapage des horizons supérieurs, habituellement les plus fertiles. Plusieurs études indiquent une teneur plus importante en éléments fins (argiles et limons), en nutriments et bases échangeables (N, P, K, Ca, Mg) dans la fraction érodée que dans le sol initial.

Parmi les autres conséquences on peut citer : le déchaussement, des plantes emportées ou recouvrement de la culture, diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes.

5.1.2. Dégâts en zones dépôts

La sédimentation et les transports solides sont gênants pour une majorité d'aménagement. Ils se traduisent par l'envasement accéléré des fossés de drainage, des canaux d'irrigation et des réservoirs (bassins) une réduction de la capacité des lits de rivières et un risque d'inondation des terres, une augmentation du coût de traitement des eaux de consommation.

5.3. Impacts de l'érosion sur le milieu social et économique

Outre le milieu physique, l'érosion affecte aussi la vie sociale des habitants. Au nombre des difficultés rencontrées, il y'a les difficultés de circulation, les contraintes matérielles et financières.

5.3.1. Difficultés de circulation

L'état inadéquat des voies dans le bassin versant agit sérieusement sur les déplacements des personnes et des biens. En effet, la circulation des véhicules semble difficile et parfois impossible surtout en saison pluvieuse dans les secteurs les plus érodés. Même le piéton doit savoir où poser ses pieds au risque de tomber dans des ravins. Aussi doivent-elles éviter d'emprunter certaines rues, de peur de se faire entraîner par la violence de l'écoulement. Toutes ces difficultés perturbent les activités des populations créant ainsi une diminution de leurs revenus déjà modestes.

5.3.2. Contraintes matérielles et financières

La lutte contre l'érosion pluviale nécessite d'énormes moyens financiers. En effet, les dispositions que prennent les populations dans le but de résoudre le problème de dégradation de leur milieu ont des incidences financières considérables. Or le revenu moyen mensuel estimé reste assez faible. A cela s'ajoute l'achat, le transport des matériaux de construction comme le sable, le ciment, les caillasses, et la main d'œuvre des ouvriers. Toutes ces dépenses expliquent la précarité des différents aménagements.

L'érosion dans le bassin versant du kou se manifeste à divers degrés et ne cesse de prendre de l'ampleur. Elle se traduit par le ravinement, la dégradation considérable de la voirie et le sapement des bâtiments. L'évolution progressive que connaît ce phénomène freine le

développement des villages riverains et suscite des inquiétudes quant à son avenir. Face à cette situation, il importe de rechercher des solutions efficaces pour renforcer les stratégies endogènes de lutte.

5.4. Simulation de la production de sédiment dans le bassin versant du kou avec le modèle SWAT

La grande diversité des modèles hydrologiques donne l'embarras du choix pour une application donnée. Afin d'éviter les erreurs et les inconvénients dus au mauvais choix, il est nécessaire d'effectuer le choix du modèle en fonction des objectifs de l'étude.

Le choix du modèle s'est basé sur les critères de choix suivant :

- La disponibilité des données d'entrée
- La capacité du modèle à simuler les données manquantes
- La capacité du modèle à simuler la réponse hydrologique tout en tenant compte de la composante souterraine
- La capacité du modèle à analyser l'impact conjugué du climat et des activités anthropiques sur la réponse hydrologique globale des bassins versants
- La facilité d'utilisation grâce à une interface conviviale facilitant le traitement de données et la représentation des données et des fichiers de sortie.

Cependant, il n'est pas toujours évident de trouver un modèle satisfaisant à la fois toutes ces exigences. Suivant ces critères, notre choix s'est porté sur le modèle agro hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

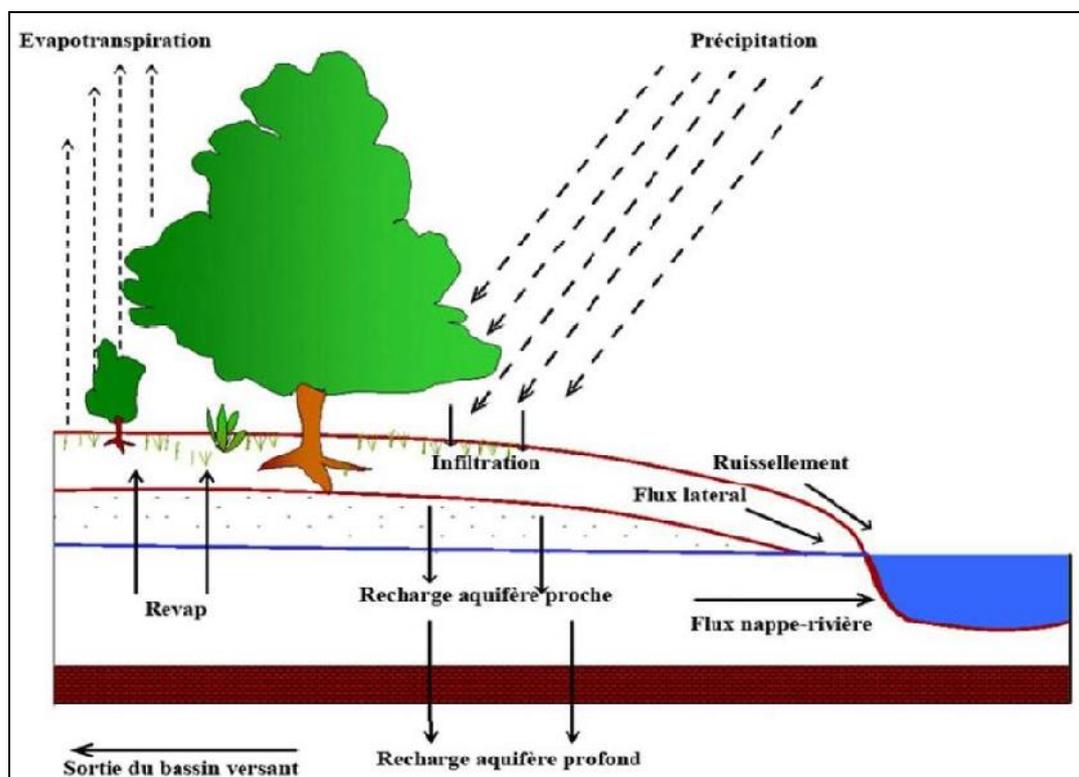
SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle hydrologique conçu et développé par des chercheurs de l'USDA (United States Department of Agriculture) -Agricultural Research Service (Arnold G. et *al.* 1998). Selon le critère de la représentation spatiale SWAT est un modèle physique semi-distribué permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques en vue de modéliser les flux d'eaux et autres solutés à l'échelle d'un bassin versant. La modélisation est faite à un pas de temps continu ou événementiel. Il permet de modéliser plusieurs événements tels que la réponse hydrologique, l'étude des effets du climat et du changement climatique, l'effet du changement de l'occupation des sols, l'étude de l'effet et du transfert des charges polluantes, l'étude des

problématiques de la gestion de l'eau d'irrigation et de la gestion de la ressource, l'étude des effets des crues sur des structures hydrauliques projetées (Gassman P. et *al.*, 2014). SWAT est majoritairement utilisé pour les études portant sur les questions hydrologiques, et dans des situations moins nombreuses sur les questions de transports de sédiments et de transferts de polluants (Gassman P. et *al.*, 2007). Les études précédemment effectuées démontrent qu'il est possible d'obtenir avec de bons résultats avec le modèle SWAT dans le domaine de la simulation et la prédiction du ruissellement et des charges sédimentaires (Gassman et P. *al.*, 2007).

Dans le but de faciliter et automatiser la préparation des données d'entrées, de rendre plus conviviale la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation le modèle SWAT a été couplé avec le logiciel de SIG ARCGIS. L'établissement du bilan hydrologique avec SWAT se fait en deux phases (Lang M. et *al.*, 2011) :

- Une phase dite terrestre dans laquelle les différents termes nécessaires à l'établissement du bilan hydrologique à proprement parler seront calculés

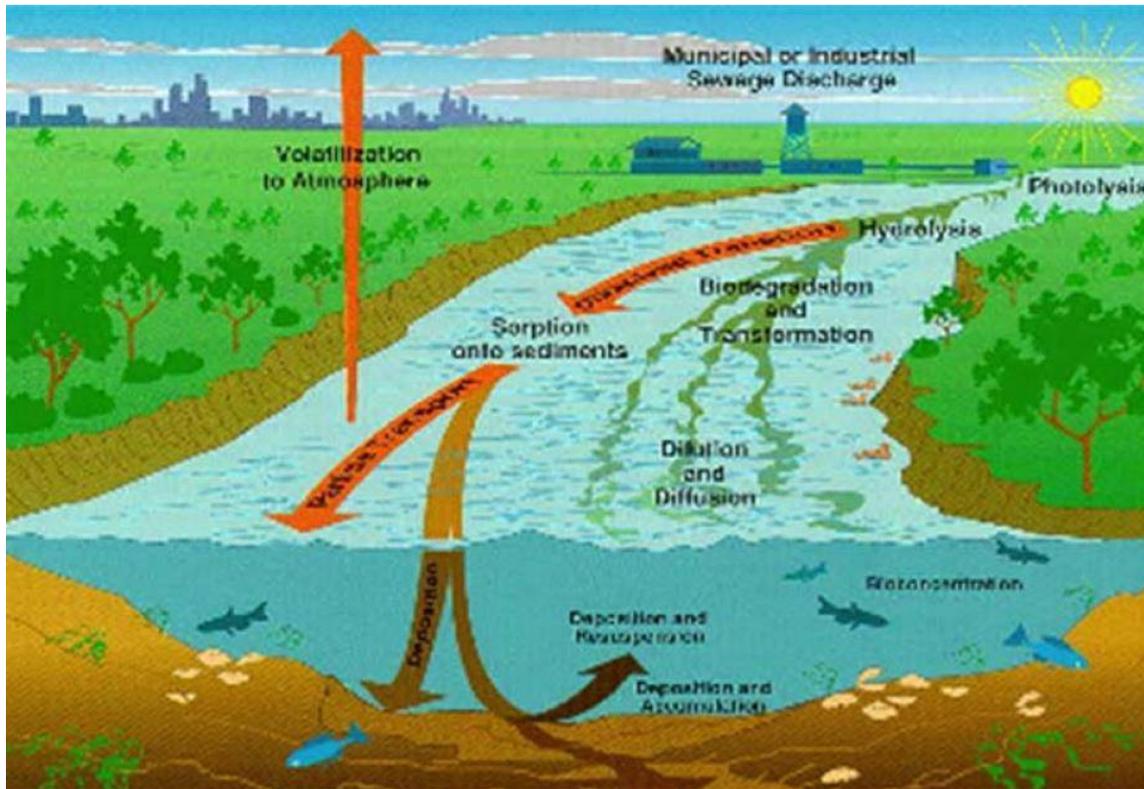
Figure 37 : Composantes du bilan hydrologique modélisé par SWAT



Source : Biesbrouck et *al.*, 2002

- Une phase dite “de routage” dans laquelle le mouvement de l’eau et des différents éléments (sédiments, carbones, azote, phosphore sera modélisé à travers le réseau hydrographique jusqu’à l’exutoire)

Figure 38 : Transport des éléments (eau, sédiments, pesticides, nutriments, ...) au sein du réseau hydrographique



Source : (Lang, J., et B. 2011)

Ce modèle est un modèle complexe demandant un grand nombre de données d’entrée. Cependant, nous pouvons compter quelques travaux effectués avec SWAT dans la sous-région de l’Afrique de l’Ouest, zone caractérisée par le manque de données d’observation disponibles, qui cependant ont donné de bons résultats de modélisation (Schuol J. et *al.*, 2007 ; Bossa et al., 2012 ; Awotwi et al., 2014 Begou J. et *al.*, 2016 ; Poméon T. et *al.*, 2018).

❖ Mise en route du modèle SWAT

La première partie de la modélisation consiste à la simulation avec Arcswat et la deuxième partie concerne le calage et la validation du modèle qui se fait grâce au logiciel Swa_cup.

❖ Délimitation des sous-bassins versants

Pour cette première étape, consiste à délimiter les sous-bassins versants en se basant sur le modèle numérique de terrains représentant la donnée topographique.

❖ Définition des Unités de réponses hydrologiques (URH)

Les URH représentent l'unité de calcul dans le processus de discrétisation spatiale effectué par SWAT permettant de quantifier les différents processus (le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration...) de chaque unité spatiale. Les URH sont obtenus à partir de la combinaison du découpage des sous-bassins, de l'occupation des terres, du type de sol et des pentes. Il y a deux possibilités pour la définition des URH : la première possibilité consiste à homogénéiser les HRU pour chaque sous-bassin et la deuxième consiste à assigner autant de URH que possible au bassin versant. La seconde possibilité a été choisie, car étant plus représentative. Il s'agit alors de déterminer un pourcentage seuil pour la superficie du sous-bassin, le type de sols, les classes de pente et l'occupation des terres. Cela définit les spécificités qui ne seront pas prises en compte lors de la simulation.

La valeur de seuil communément utilisée pour les trois classes (land use, slope et soil) est de 20 % (« Soil and Water Assessment Tool: User's manual version 2000 »).

Dans le cadre de cette étude, des seuils différents ont été optés en examinant la distribution des différents éléments de chaque classe. Les seuils établis dans notre cas étaient de 15 % pour le type d'occupation des terres, de 40 % pour le type de sol et de 20 % pour la classe de pente.

❖ Intégration des stations météorologiques et création des tables par le modèle

Il s'agit de données qui concernent la pluviométrie, les températures minimales et maximales à pas de temps journaliers. En ce qui concerne les autres données telles que les données sur la vitesse du vent, l'humidité relative et le rayonnement solaire, elles ont été directement simulées à partir d'un générateur de climat associé à arswat.

Après ces données intégrées arswat procède à la construction des différentes tables des informations nécessaires à la création des données d'entrées utilisées par le modèle.

5.4.1. Calage et validation

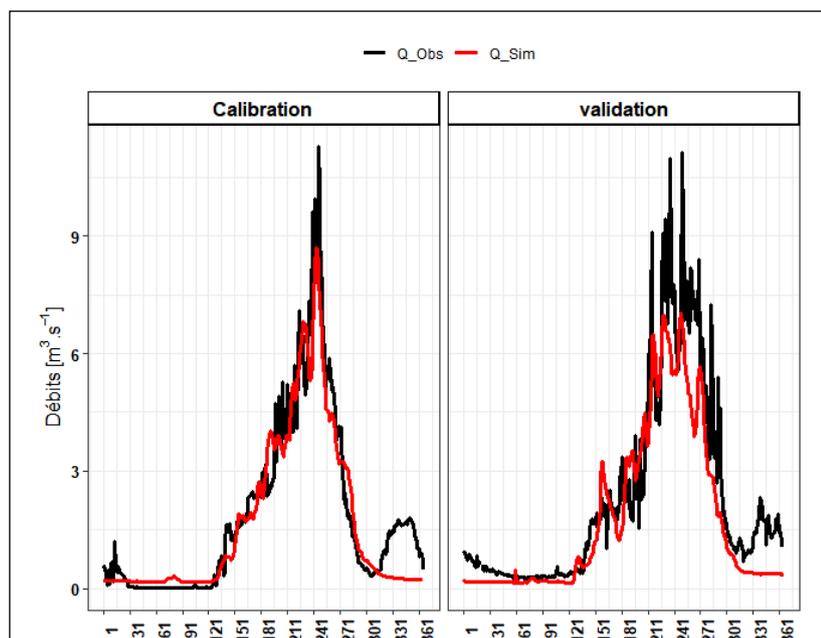
Le calage a pour but d'établir une concordance entre les variables simulées et observées en modifiant les paramètres hydrologiques et hydrauliques en vue de les estimer avec plus de certitudes. Elle consiste dans un premier temps à ajuster le bilan hydrique qui contrôle l'ensemble des processus hydrologiques sur le bassin. Cet ajustement ne peut se faire sans une

modification des paramètres d'occupation des sols qui ont une incidence essentielle sur le bilan hydrologique.

La première variable qui avait été corrélée concerne les débits à l'exutoire du cours d'eau, à la station de Badara au pas de temps journalière. Le choix de cette station se justifie par le fait que les données hydrométriques sur le bassin versant du Kou souffrent de plusieurs lacunes du point de vue de leur qualité et quantité (Mamadou, 2006). Normalement, la dernière station hydrométrique en aval, la confluence Niamé-Baoulé, devrait être choisie comme exutoire pour cette modélisation. Cependant, en saison hivernale, cette station n'est plus accessible pour cause d'inondations rendant tout jaugeage impossible. Par conséquent la délimitation s'est fait à la zone en amont de la station de Badara.

Puisque les valeurs mesurées de sédiments n'étaient pas disponibles, leurs flux n'avaient pas été calibrés. Trois indices avaient permis d'apprécier la corrélation entre les valeurs de débit simulées et les valeurs observées. Il s'agissait dans un premier temps du coefficient de corrélation. Cet outil d'analyse permet de mesurer la relation existant entre deux séries de données. Le second est le coefficient d'efficacité du modèle de Nash. Cet indice offre une évaluation plus précise de l'efficacité quant au respect des volumes écoulés et des écarts absolus (Bioteau *et al.*, 2002). Le critère de Nash varie de - 8 pour un ajustement très mauvais à 1. Une valeur proche de 1 traduit une forte liaison entre les observations et les simulations. En l'absence de biais entre les observations et les simulations, la valeur est égale à celle du coefficient de détermination de la régression (Petrescu-Maftei, 2002). Le troisième est l'indice d'agrément de Willmot qui permet d'évaluer la performance du modèle.

Figure 39 : Evolution des débits simulés et observés avec le modèle SWAT



Source : DGRE, 2018

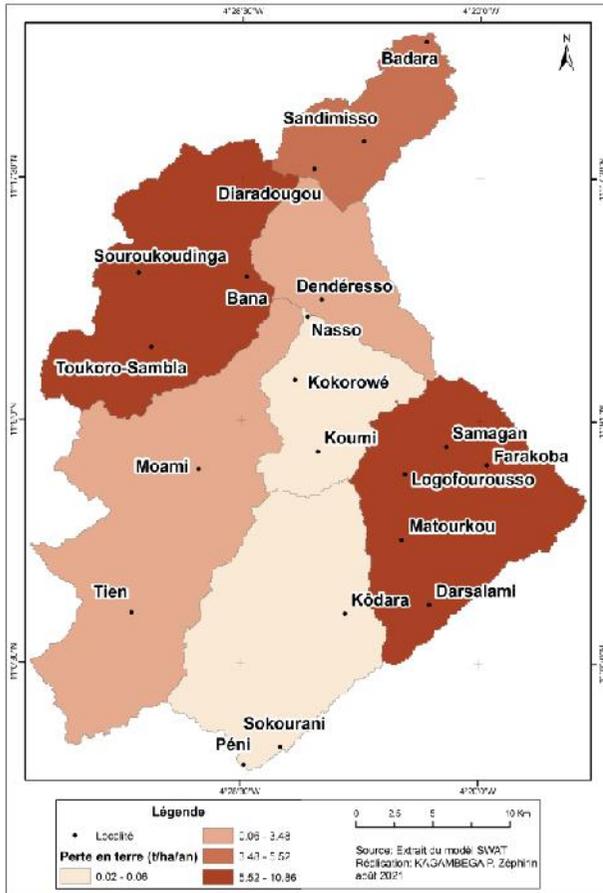
Le calage du modèle a été effectué au pas de temps journalière, afin de tenir compte des variations intra saisonnières que révèlent les coefficients d'évaluation significatifs ; soit 0,63 pour le coefficient de détermination ; 0,61 pour l'indice de Nash.

5.4.2. Production de sédiment dans le bassin versant du kou à l'horizon 2030

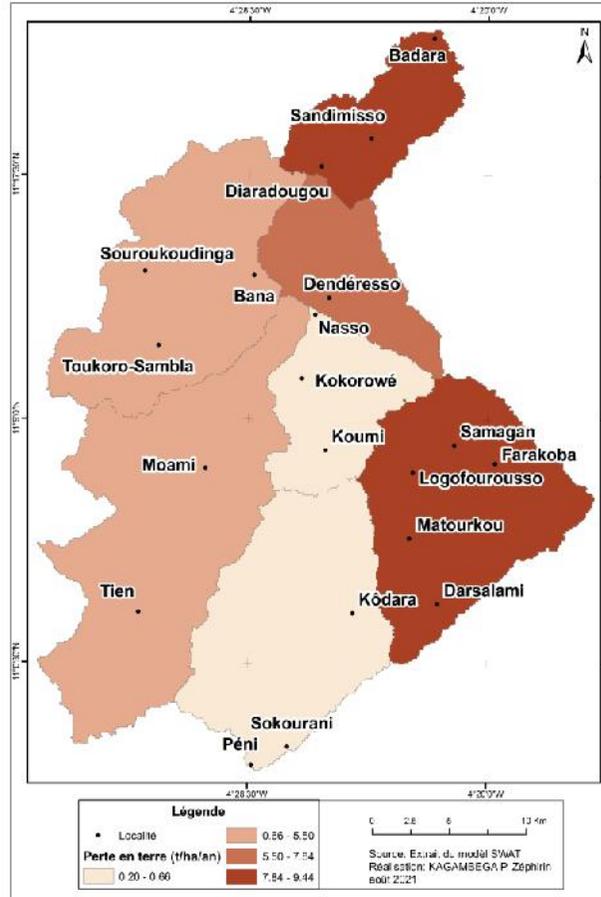
L'ensemble des simulations des scénarii faites a montré des productions de sédiments dans des gammes variées dans le bassin versant du Kou à la station de Badra. Les tendances des productions de sédiments obtenues dépendent du scénario utilisé. Sous l'effet des fluctuations climatiques seules, la production moyenne annuelle de sédiments est passée de 4,43 t/ha à 1,41 t/ha pour le RCP 4.5 et 0,58 t/ha pour le RCP 8.5 de la période 2025-2030 comparativement à la période 2010-2015. Cette réduction s'explique par la baisse de l'écoulement de surface due à la diminution de la précipitation et à l'augmentation de l'évapotranspiration réelle (Kounou, 2009). En effet wellen J. et *al.*, (2009) ont démontré que l'évapotranspiration réelle est le terme le plus dominant avec une valeur de 863,8 mm du bilan d'eau du bassin versant du kou. La dominance de ce terme sur le bassin versant du Kou trouve son explication dans la forte exploitation agricole. Les prélèvements massifs d'eau pour l'irrigation augmentent l'évapotranspiration au détriment des écoulements (Lorup et *al.*, 1998). Auparavant, l'évapotranspiration du bassin du Kou pour l'année 2000 avait également été estimée à 860 mm à l'aide de la télédétection (Traoré F. 2007).

En ce qui concerne l'effet des scénarii d'occupation des sols seuls, la production moyenne annuelle de sédiments a connu une augmentation, par rapport à celle de l'occupation des sols de référence (Lu 2017), avec une production moyenne annuelle de 5,21 t/ha. La tendance positive s'explique par l'augmentation de l'écoulement de surface résultant de la réduction de la densité de la végétation par l'accroissement des superficies agricoles (Dossou-yovo, 2011). Par contre sous l'effet combiné des fluctuations climatiques et de la dynamique du couvert végétal, il est constaté une diminution de la production moyenne annuelle de sédiments qui est descendu à de 3,04 t/ha pour le RCP 4.5 et 0,66 t/ha pour le RCP 8.5 entre la période 2010-2015 et 2025-2030. Cette tendance négative est due en fait aux effets dominants de la variabilité climatique par rapport à ceux de la dynamique du couvert végétal ; effets qui ont entraîné une baisse de l'écoulement de surface et une baisse de la production de sédiment.

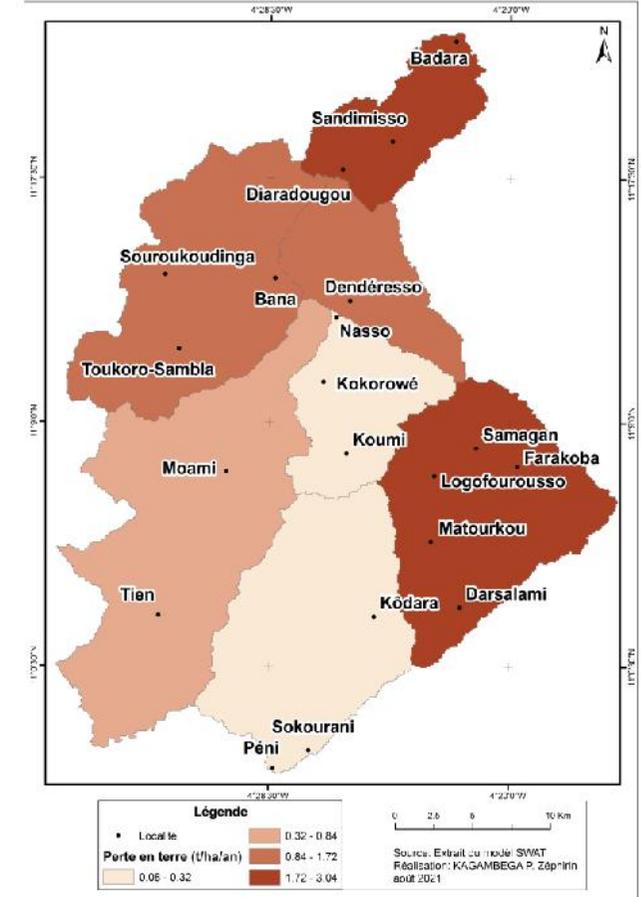
Carte 20 : Climat de référence (2010-2015) – Lu 2017



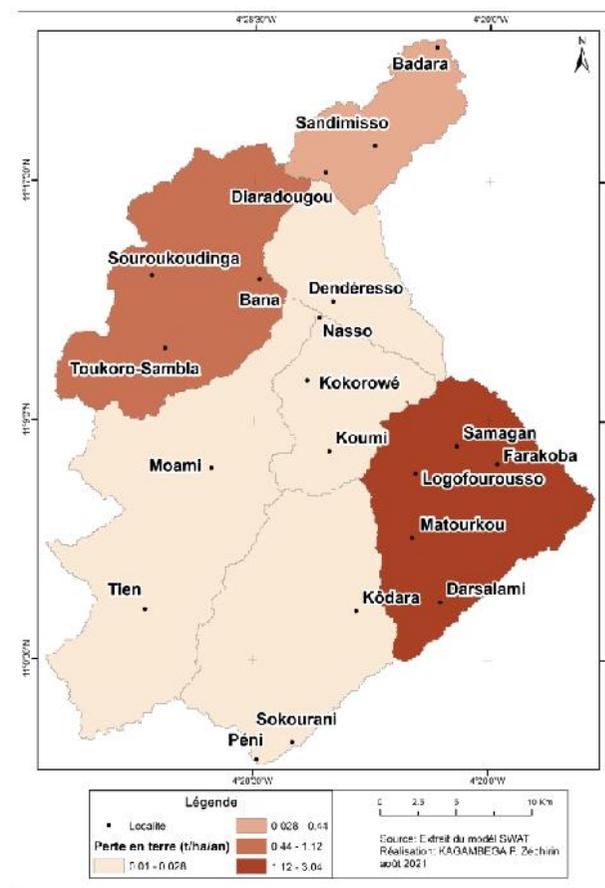
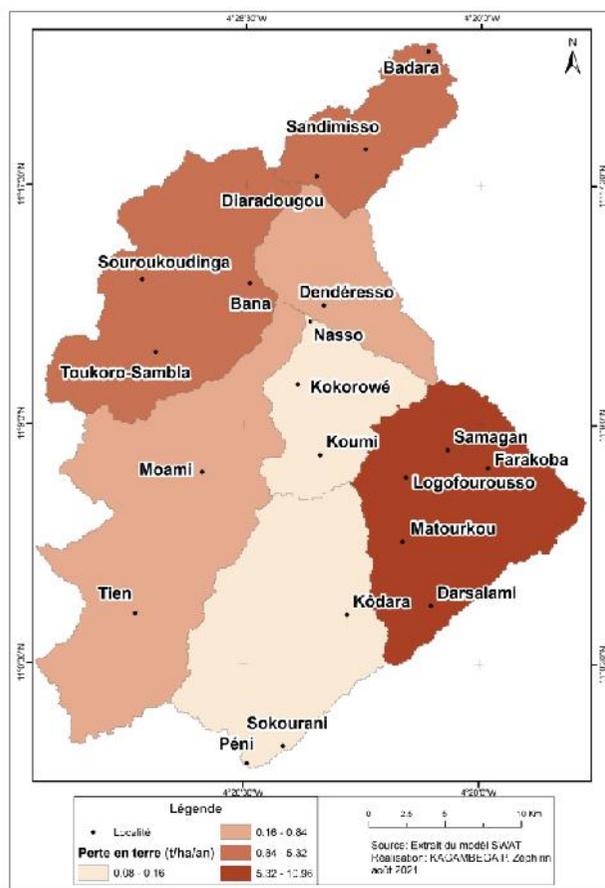
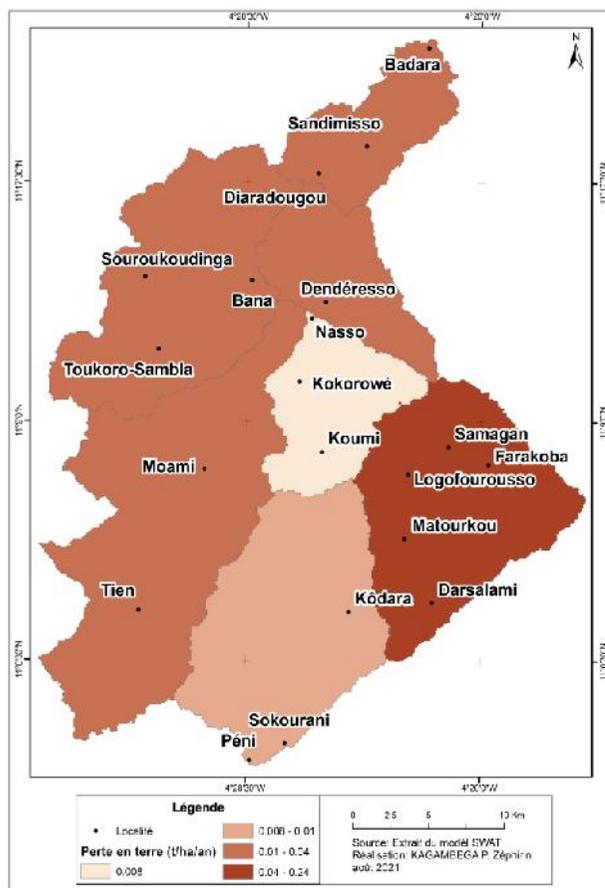
Carte 21 : Climat de référence (2010-2015) – Lu 2030



Carte 22 : Climat RCP 4.5 (2025-2030) – Lu 2017



Carte 23 : Climat RCP 8.5 (2025-2030) – Lu 2017 **Carte 24 : Climat RCP 4.5 (2025-2030) – Lu 2030** **Carte 25 : Climat RCP 8.5 (2025-2030) – Lu 2030**



CHAPITRE 6 :

PERCEPTION PAYSANNE DE LA DYNAMIQUE EROSIVE ET STRATEGIE DE LUTTE ANTI EROSIVE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

Les paysans mettent en place des mesures de restauration des sols ou de préservation de l'environnement dès lors qu'ils se rendent compte de la dégradation de leur terre. Ce chapitre présente les perceptions paysannes sur l'érosion des sols et les stratégies endogènes développées pour lutter contre l'érosion hydrique des sols.

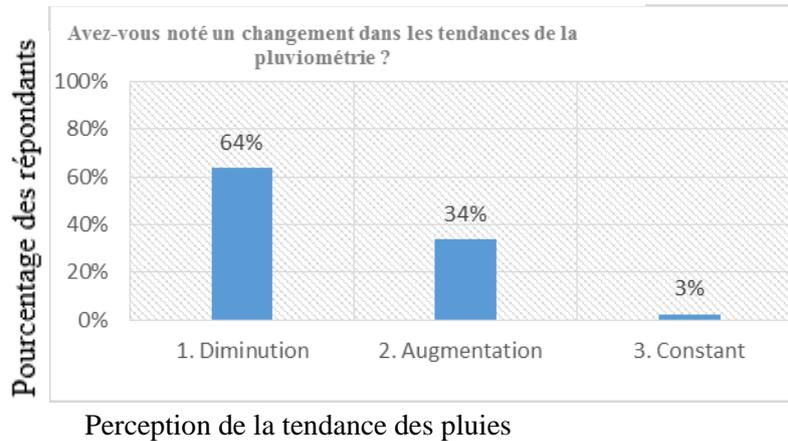
6.1. Perception paysanne de la variabilité climatique et de la dynamique d'occupation des sols.

L'appréhension des facteurs clés de l'érosion par les paysans varie en fonction des individus en rapport avec leur vécu quotidien et leur expérience dans la transformation du milieu. Pour mieux comprendre, il est nécessaire de connaître les éléments par lesquels les paysans représentent leur environnement.

6.1.1. Perception paysanne de l'évolution des paramètres climatiques

Le facteur climatique essentiel pour le paysan est la pluie en raison du rôle déterminant qu'elle joue dans les activités agricoles. Les analyses de la perception paysanne ont concerné certains paramètres du climat de l'environnement local : la variation de la pluviométrie, son intensité, la fréquence des événements pluviométrique extrême, la fréquence des poches de sécheresse, les inondations ainsi que l'évolution de la température. 64 % des paysans enquêtés perçoivent la dégradation du climat due à une diminution des pluies figure avec une augmentation des intensités (53 %) et une fréquence des poches de sécheresse (59 %). La majorité de personnes enquêtées ont constaté une augmentation de la fréquence des inondations. Pour ce qui est de la fréquence des événements extrêmes 52 % des enquêtés disent avoir constaté une augmentation. La figure 35 montre le pourcentage des enquêtés qui ont donné leur avis sur les tendances pluviométriques.

Figure 40 : Perception paysanne de la tendance des pluies

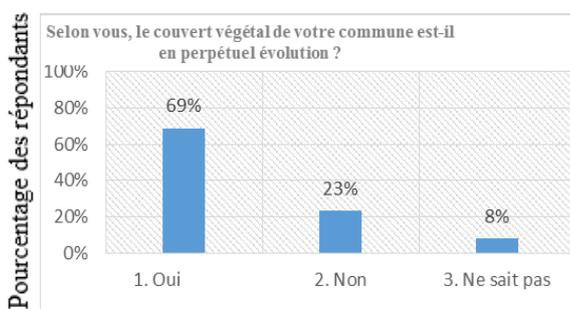


De l'analyse des résultats de l'enquête, 89 % des paysans dans le bassin versant du Kou trouvent que les températures ont augmenté ces 20 dernières années. L'augmentation des températures peut influencer la multiplication rapide des insectes avec des dégâts importants sur les cultures (Habdouh H. et *al.*, 2016). Selon Dipama J-M, 2016, la dégradation des conditions climatiques induit une baisse de la fertilité des sols et une perte de la diversité biologique.

6.1.2. Perception paysanne de la dynamique d'occupation des sols

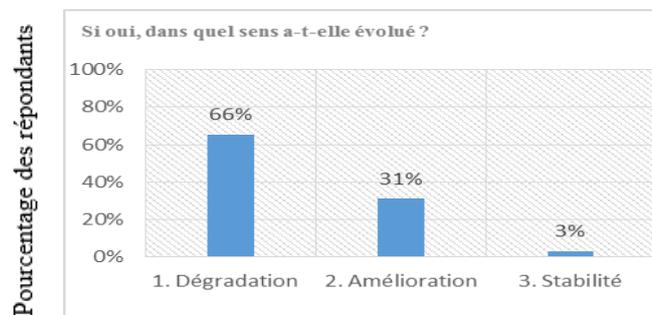
La dynamique d'occupation des sols du bassin versant du Kou est observée par les populations à divers niveaux. Les unités d'occupation du sol dont l'évolution est perçue par la population sont la végétation, l'habitat, les champs, les plans d'eau et les sols nus. Bien que diversement appréciée, la tendance à l'évolution du couvert végétal est affirmée par 69 % des personnes interrogées et parmi eux 66 % trouve que cette évolution tend vers la dégradation. Les figures 36 et 37 montrent l'appréciation de l'évolution du couvert végétal dans le bassin versant du Kou.

Figure 41 : Perception paysanne de l'évolution du couvert végétal



Perception de l'évolution du couvert végétal

Figure 42 : Perception paysanne de la tendance de l'évolution du couvert végétal

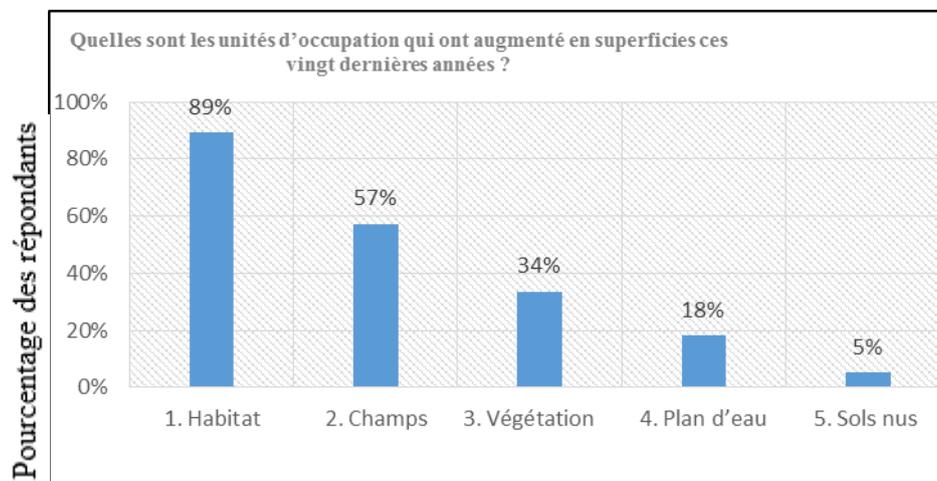


Perception de l'évolution du couvert végétal

Dans l'ensemble des unités d'occupation du sol, les personnes enquêtées pensent que l'habitat vient en premier position en termes d'augmentation de superficie soit 89 % des répondants, suivie des champs (57 %), la végétation (34 %), plan d'eau (18 %) et enfin les sols nus (5 %).

Cela montre un accroissement des zones de culture et un étalement urbain au détriment de la végétation naturelle. La figure 43 présente les unités d'occupation du sol qui ont augmenté de superficie dans le bassin versant du Kou

Figure 43 : Perception paysanne de l'évolution des unités d'occupation



Perception de l'évolution des unités d'occupation des sols

De ce qui ressort des entretiens, les causes de la dégradation du couvert végétal sont principalement, les coupes abusives du bois, les défrichements anarchiques et la divagation des animaux. Cela pourrait avoir comme conséquences la désertification et les changements climatiques. Du point de vue de certains auteurs (Valentin, 1994; Boulain *et al.*, 2006; Niang, 2006; Karambiri *et al.*, 2009), la dégradation du couvert végétal entraîne l'apparition de sols dénudés qui sont ainsi exposés aux intempéries du climat. Parmi les effets néfastes, on peut citer les conséquences multiples tels que la formation des croûtes superficielles, l'augmentation des ruissellements, le manque d'infiltration conduisant ainsi à une baisse progressive du niveau de la nappe phréatique, l'augmentation des risques d'inondation, et une perte de fertilité accélérée des sols, la migration des jeunes et le développement des conflits.

6.1.3. Perception paysanne de l'érosion hydrique des sols

Le paysan est en général conscient de l'état de dégradation de son terroir qu'il perçoit à travers des variations du milieu naturel. L'érosion hydrique est perçue par les paysans dans le bassin versant du Kou

à travers ces expressions : appauvrissement des sols ; destruction des cultures ; tarissement des sources et ensablement du Kou... Plusieurs causes reviennent souvent entre autres : la variabilité climatique avec la survenue de grosse pluie et la dégradation du couvert végétale.

Lors de nos entretiens avec les structures intervenant dans le bassin, il ressort que l'érosion est aujourd'hui une réalité dévastatrice dans le bassin versant du Kou. Elle s'observe à toutes les échelles et ses manifestations vont en s'aggravant. En plus des agressivités pluviométriques de ces deux dernières années, les conditions biophysiques, les modes d'exploitations des ressources naturelles exposent d'avantage le bassin versant du Kou à la dégradation :

- Sols sablo-argilo à structure friable très érodibles ;
- Versant déboisés et soumis à l'agriculture itinérante ;
- Pentes moyennes fortes (3,5%) ;
- Dévastation des berges et destruction prononcée de la ripisylve.

Les manifestations les plus visibles de cette régression des ressources naturelles et de la détérioration de l'environnement sont perceptibles à tous les niveaux et inquiètent même les populations. De leur propos, on retiendra que :

- Depuis quelques années, l'eau monte plus vite dans les cours d'eau après les pluies ;
- Les puits qui jadis regorgeaient d'eau tarissent maintenant ;
- Le nombre et la profondeur des ravines se sont accrus, empêchant la circulation entre les rives ;
- Les surfaces ensablées par les torrents sont vastes ;
- Le lessivage et l'encroûtement des terres sont de plus en plus étendus ;
- La baisse des rendements des cultures est nette.

La résultante la plus « fâcheuse » de toutes ces manifestations de l'érosion est l'ensablement de la forêt classée du Kou et surtout des sources vitales qu'elle abrite. Les figures 39 et 40 montrent respectivement l'ensablement de la rivière Kou et une surface érodée dans le bassin versant.

Photo 3 : Ensablement de la rivière Kou



Auteur : KAGAMBEGA P. Z., 08-11-2019

52 % des personnes enquêtées dit avoir observé des pertes de terre dans leur champ et parmi eux 32 % estiment que l'ampleur de ces pertes en terre est forte, 52 % l'estiment moyenne et 16 % estiment que l'ampleur de la perte faible. Les figures 44 et 45 montres la perception du niveau d'érosion dans les champs par les paysans du bassin versant du Kou.

Figure 44 : Observation des pertes de terre dans les champs

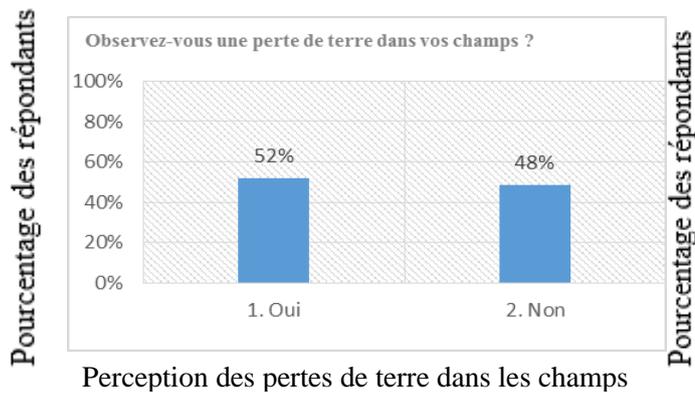
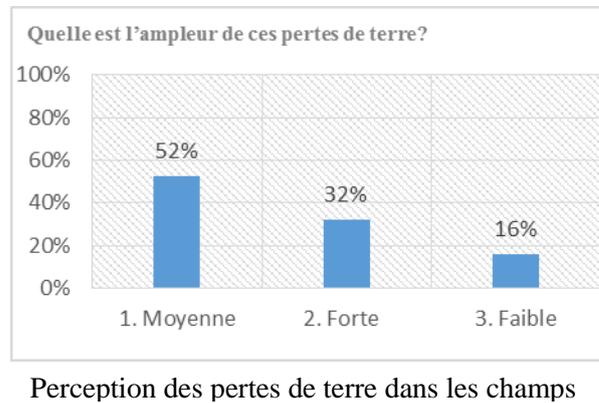


Figure 45 : Ampleur des pertes de terre dans les champs

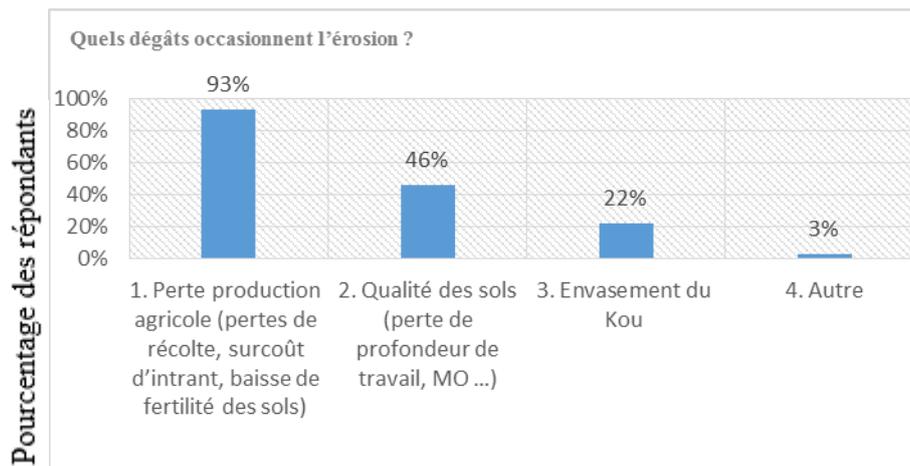


Comme conséquences de l'érosion, les acteurs intervenants dans le bassin versant du Kou s'accordent sur le fait que l'érosion hydrique va entrainer:

- ✚ Les ruissellements et les érosions en nappe en tête du réseau hydrographique. Les terres constituées de géo systèmes de glacis supérieur sont les zones d'apport d'eau vers les premières dépressions (têtes de ravine, têtes de lit mineur des cours d'eau)
- ✚ Les ruissellements concentrés et les érosions concentrés
 - Les ruissellements en rigoles (formation de rigoles) ;
 - Les ruissellements en ravines (formation de ravines) ;
 - Les ruissellements en ravins (formation de ravins).

La baisse des rendements agricoles revient le plus souvent au nombre des dégâts causé par l'érosion hydrique cité par les paysans du bassin versant. En effet 93 % de la population enquêté pense que l'érosion occasionne la baisse de leur rendement agricole et 22 % disent que l'érosion entraine l'envasement du Kou.

Figure 46 : Perception de l'impact de l'érosion par les paysans



Perception de l'impact de l'érosion

6.2. Stratégie endogène de lutte antiérosive

6.2.1. Cadre juridique, institutionnelle et organisationnelle

Le Burkina Faso est l'un des pays les plus pauvres dont l'économie est basée sur l'agriculture, l'élevage, la foresterie et la pêche. Conscient de cela, le gouvernement s'est engagé depuis plusieurs années dans la protection de l'environnement et dans la gestion durable des ressources naturelles. Pour ce faire, il a adopté des lois, signé et ratifié une série de convention et a mise en place un dispositif administratif et technique pour la gestion des changements climatiques et la dégradation des terres. Au titre des lois, il s'agit de :

- la loi n°006/97/ADP du 31 janvier 1997 portant code de l'environnement ;
- la loi n° 002-2001/AN du 08 février 2001 portant loi d'orientation relative à la gestion de l'eau ;
- la loi n° 034-2012/AN portant réorganisation agraire et foncière au Burkina Faso.

Pour ce qui est des conventions il s'agit de :

- la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), signée le 12 juin 1992 et ratifiée le 2 septembre 1993 ;
- la ratification du protocole de Kyoto le 31 mars 2005 ;
- la signature le 14 octobre 1994 de la Convention des Nations-Unies pour la Lutte Contre la Désertification (CCD) et ratifiée le 26 janvier 1996.

Parmi les dispositifs administratifs et techniques mises en place pour la gestion des changements climatiques et la dégradation des terres on peut citer :

- le Conseil National pour l'Environnement et le Développement Durable (CONEDD) pour assurer que les actions de développement qui préservent l'environnement ;
- le Conseil National de Secours d'urgence (CONASUR) pour gérer les crises, les inondations et les famines ;
- l'Autorité Nationale Désignée (AND) qui doit permettre au Burkina Faso de bénéficier des opportunités de financement des actions de lutte contre les effets néfastes de la variabilité et des changements climatiques ;
- le Plan d'Action de Gestion Intégré des Ressources en Eau (PAGIRE) ;
- le Programme National de Gestion des terroirs (PNGT) ;
- la création des structures de gestion des ressources en eau (Agence de l'Eau (AE), le Conseil National de l'Eau (CNE), les Comités Locaux de l'Eau (CLE)).

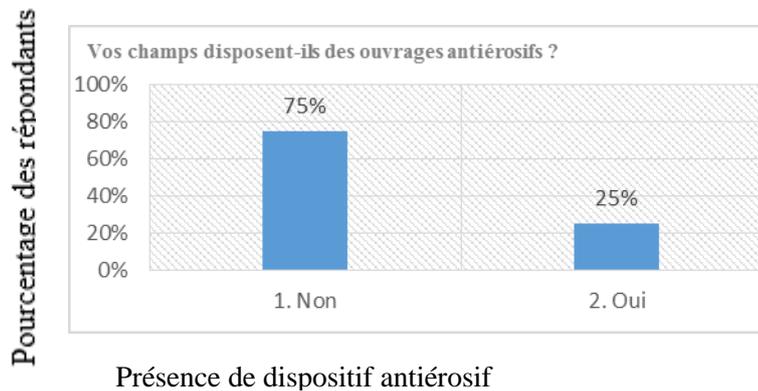
Le Burkina Faso a aussi adhéré au Mécanisme de Développement Propre (MDP) du protocole de Kyoto qui permet d'attirer les investissements directs étrangers, de développer la coopération technique avec d'autres pays, de renforcer les capacités et de bénéficier de la venue des technologies dans le pays.

6.2.2. Pratiques résilientes endogènes de lutte antiérosive dans le bassin versant du Kou

Toutes les civilisations agraires traditionnelles de l'Afrique subsaharienne, recèlent de connaissances et pratiques développées face aux aléas de la nature (Baudoin, 2012). Dans les Hauts-Bassins, région abritant le bassin versant du Kou, les aménagements antiérosifs réalisés représentent 7% des aménagements au niveau national (DGAHDI, 2018). Cela témoigne de la faible réalisation des aménagements dans la zone d'étude. En effet 75% des enquêtés disent ne pas avoir recours aux dispositifs antiérosif. Les 25% autres développent plusieurs stratégies pour réduire la vulnérabilité de leurs sols à l'érosion. Dans de nombreux villages du bassin, on note des actions isolées entreprises par les exploitants agricoles en vue de réhabiliter et de restaurer les terres dégradées. Il s'agit entre autres, de

la pratique des cordons pierreux, la mise en place et l'entretien des bandes enherbées, le traitement des ravines du paillage, de la jachère, le zaï etc

Figure 47 : Présence de dispositif antiérosif dans les champs



6.2.2.1. Cordons pierreux

Les cordons pierreux sont des ouvrages antiérosifs constitués par un arrangement judicieux de pierres sur les courbes de niveau. Ce dispositif permet de réduire l'érosion et augmenter le stock d'humidité du sol (Ouédraogo, 2005). Les matériaux utilisés sont des blocs de cuirasse ferrugineuse appelés moellons. Les moellons sont de formes et de dimensions variables. La largeur et la hauteur des cordons pierreux sont comprises entre 20 et 30 cm en moyenne. La distance maximale entre les diguettes est de 25m. Dans certains villages dans le bassin, ce dispositif est remplacé par endroit par des sacs remplie de terre (Photo 6)

Photo 5 : Diguette en pierre en état de dégradation



Auteur : KAGAMBEGA P. Z., 12-06-2019

Photo 6 : Sac rempli de terre en état de dégradation



Auteur : KAGAMBEGA P. Z., 12-06-2019

Les cordons pierreux, permettent la sédimentation des particules (sables, mais aussi terre fine, matière organique) à l'amont de la diguette, une augmentation de l'infiltration des eaux ruisselantes (Hien, 1995) dans les conditions soudano-sahéliennes. Ce sont des ouvrages adaptés à des terres de très faible pente.

6.2.2.2. Jachère naturelle

La jachère naturelle est l'une des pratiques largement adoptée par les paysans pour faire face aux problèmes de baisse de la fertilité des sols. Elle fait partie des pratiques agricoles traditionnelles les plus utilisées dans le milieu d'étude. Cette pratique consiste à laisser le sol au repos pendant quelques années selon la gravité de l'état de dégradation en vue d'une reconstitution progressive des éléments empruntés à ce sol pour la production agricoles.

La place de la jachère naturelle dans les systèmes agraires est néanmoins fortement remise en question aujourd'hui. En effet, de nos jours, la durée de la jachère se raccourcit à cause de non disponibilité des terres due à une forte pression démographique. Toutefois, cette durée varie en fonction de la taille de l'exploitation et de la disponibilité des terres.

6.2.2.3. Le paillage

Le paillage est une technique biologique très répandue et très ancienne. Il consiste à recouvrir à la surface du sol de débris végétaux tels que les résidus de culture, paille, tiges ou branchages divers. Il protège le sol contre l'impact des gouttes de pluie et diminue le ruissellement, en outre il favorise l'activité des termites qui incorporent dans le sol la matière organique décomposée et creusent des galeries qui améliorent la perméabilité du sol. Il en résulte un ameublissement du sol et une augmentation de sa porosité qui permettent une meilleure infiltration de l'eau (Delaite ; Pastor, 1997). Cependant cette technique de paillage doit être accompagnée par une mise en défens qui va permettre une croissance plus rapide des nouvelles pousses.

Le paillage est en fait une technique d'adaptation aux changements climatiques car, lorsque les précipitations sont extrêmes, les effets néfastes qui pourraient en découler sont plus ou moins réduits. En cas de fortes pluies, la biomasse absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie tombantes, ce qui permet à l'eau de pluie de lentement se répandre à la surface, où elle s'infiltré dans le sol.

Cependant malgré les effets bénéfiques du paillage, peu de résidus de récolte restent sur le champ après la récolte car ils sont utilisés pour l'alimentation du bétail ou comme source d'énergie (bois de chauffe).

La faible disponibilité de paille et la distance de transport sont également des contraintes du paillage. En effet, la forte demande en paille pour l'édification des toitures ou d'objets artisanaux et l'alimentation du bétail est si primordiale que l'allocation des résidus pour la protection des sols est difficile (Mando et *al.*, 2001). De même, des feux de brousse causent la disparition de la paille et constituent aussi un facteur limitant l'utilisation du paillage.

6.2.2.4. Bande enherbé

La bande enherbée est une bande de végétation permanente réalisée suivant les courbes de niveau. Les bandes ont une largeur comprise entre 0,5 à 10 m. L'espèce *Andropogon gayanus* est généralement utilisée.

6.2.2.5. Zaï agricole

La pratique du zaï est observée sur les terres complètement dégradées, dans le Nord du Burkina Faso entre les années 1982 et 1984. Cette technique n'est pas beaucoup utilisée dans le bassin versant du Kou. C'est une pratique traditionnelle permettant la récupération des sols dégradés, qui allie la capture du ruissellement et la localisation de la fumure et de l'eau disponible dans des cuvettes (Roose, 1989). Le zaï signifie en moré « se lever tôt et se hâter pour préparer sa terre » ou encore « casser et émietter la croûte du sol avant les semis » (Kaboré, 1994). C'est une technique de récupération des terrains encroûtés qui consiste à creuser des trous de 20 à 40 cm de diamètre et de 10 à 15 cm de profondeur afin de recueillir les eaux de ruissellement et de les laisser s'infiltrer. Le déblai est déposé en croissant vers l'aval pour capter les eaux de ruissellement. La matière organique y est ensuite apportée en quantité variable selon les paysans (une poignée de main soit environ 600 g/ trou) (Zougmoré et *al.*, 1993) sous forme de fumier de compost, avant la période de semis.

Les principaux avantages du zaï sont : la capture des eaux de ruissellement et de pluie, la préservation des semences et de la matière organique, la concentration de la fertilité et des eaux disponibles au début de la saison des pluies. L'augmentation de la rugosité de la surface du sol permet de ralentir le ruissellement, le vent, au ras du sol, de capter au fond des cuvettes des débris organiques et les particules fines et de protéger les plantules. Le gros inconvénient de cette technique reste cependant la difficulté de creuser les poquets. C'est une technique à haute intensité de travail, qui pose des problèmes aux familles disposant de peu de bras valides. L'autre inconvénient majeur est l'installation de diguettes en association avec le zaï. L'expansion du zaï peut être aussi limitée par la disponibilité du fumier ou du compost. Aussi le manque de matériel pousse certains paysans à ne le réaliser que sur de petits espaces.

6.2.2.6. Zaï forestier

Le zaï forestier est une technologie endogène de récupération des espèces ligneuses à partir de la technique de récupération agricole des zipellés (Koutou, 2006). Il est utilisé par les paysans dans le cadre de la protection des forêts dans le bassin versant du Kou. Elle est née du fait de la remarque pertinente de certains paysans qui, voyant souvent pousser certaines essences ligneuses dans les poquets de zaï, les ont protégées contre les animaux. En effet, la matière organique apportée par le vent et le fumier contient des graines de diverses espèces arborées prêtes à germer après le passage dans le tube digestif des ruminants (Roose et *al.*, 1993; Delaite et Pastor, 1997). Les conditions du zaï donnent un environnement favorable à la régénération de certaines essences forestières.

Le principe consiste à laisser pousser et à entretenir dans une cuvette sur trois les plantules des arbres parmi la culture au moment du désherbage (Delaite et Pastor, 1997). A la récolte, les tiges sont cassées à un mètre de hauteur de manière à protéger la jeune plantule de l'érosion et de la vue du bétail. Au bout de quelques années (5ans) on peut reconstituer un couvert forestier dont les arbustes sont taillés en taillis ou perches (premières récoltes de bois de feu).

6.2.2.7. Buttage et billonnage

Le buttage consiste à rassembler la terre au pied des plantes. C'est une pratique endogène répandue dans le milieu d'étude. Au cours des entretiens, il ressort que cette pratique :

- favorise l'enracinement des plantes (une meilleure utilisation des eaux de pluie) ;
- augmente la résistance des plants à la verse ;
- permet l'enfouissement des mauvaises herbes et des résidus de récolte.

Le buttage permet de réduire les pertes par lessivage et celle due à l'érosion. Il est souvent utilisé dans la production des racines et tubercules et est bien adapté dans la culture de l'igname.

Le billonnage et le labour avec incorporation des résidus sont des pratiques culturelles rentrées dans les habitudes des producteurs. Ils consistent à accélérer le processus de décomposition des résidus incorporés qui après minéralisation libèrent les nutriments qui fertiliseront le sol.

6.2.2.8. Autres pratiques paysannes de gestion des terres

Les autres pratiques endogènes de gestion des terres observées sur terrain sont : la rotation céréale–légumineuses à graines, l’association céréale–légumineuses à graines et enfin la rotation coton–céréale. Les systèmes de rotation et d’association à base de légumineuses ayant une valeur économique sont des pratiques très anciennes dans le milieu d’étude. Le fonctionnement de ce système repose sur les effets bénéfiques de la fixation symbiotique de l’azote atmosphérique et contrairement aux plantes de couverture, ces légumineuses à graines procurent au producteur des produits alimentaires et des ressources financières.

La rotation coton–céréale n’est rien d’autre qu’une pratique qui permet au producteur de faire profiter à la plante subséquente des effets résiduels de l’engrais qu’il apporte aux cotonniers. Cette pratique permet de soutenir lorsque les doses d’application sont respectées, le rendement de la culture subséquente pendant au moins deux saisons culturales. En effet, le phosphore est un nutriment qui se libère progressivement dans le sol.

Ces différentes stratégies endogènes de gestion des terres permettent aux producteurs dans une certaine mesure de satisfaire leurs besoins d’existence et de subsistance. Elles sont dans leurs ensembles techniquement, socialement, culturellement et économiquement acceptables par les communautés rurales. Néanmoins, elles comportent des limites.

6.3. Limites des stratégies endogènes de gestion des terres

Plusieurs facteurs limitent l’efficacité des stratégies endogènes de gestion durable des terres. La pratique des jachères naturelles est fortement compromise de nos jours à cause de l’évolution de la densité de la population. En effet, la densité de la population ne permet plus la pratique du système traditionnel de jachère (15 à 30 ans). La durée de la jachère se raccourcit progressivement (3 à 5 ans), ce qui ne permet pas la parfaite reconstitution des éléments nutritifs du sol. Le développement de la monoculture pour des raisons économiques entraîne l’abandon progressif des pratiques traditionnelles de gestion de la fertilité des sols telles que l’association de cultures et la rotation culturale.

Quant au zaï, il demande une haute intensité de travail pour creuser les poquets et l’installation des diguettes, à cela s’ajoute le problème de la disponibilité du fumier ou du compost.

Les résidus des récoltes sont utilisés comme source d'énergie ou pour l'alimentation du bétail ce qui limite l'utilisation de la paille. La disponibilité de la paille est également mise en rude épreuve avec les feux de brousse

6.4. Impact des dispositifs CES pour la réhabilitation d'écosystème dégradé

L'efficacité des techniques de récupération des terres dégradées a été testée dans le bassin versant du Kou au niveau de la forêt classé de Kuinema. Les techniques utilisées sont les cordons pierreux, le zaï (forestier et agricole) et une combinaison du zaï agricole et de cordons pierreux. L'objectif étant et de suivre l'impact des techniques CES/DRS sur la dynamique de la végétation et d'évaluer l'impact des techniques CES/DRS sur la croissance et le rendement du sorgho.

✚ Au niveau du couvert végétal :

- Le nombre de familles, de genres et d'espèces augmente significativement avec les aménagements. En 2010, le zaï forestier a permis un accroissement du nombre d'espèces de 59,26% et le cordon pierreux de 9,26% par rapport au Témoin non aménagé. Ces résultats corroborent ceux trouvés en milieux sahéliens où des études similaires ont une amélioration de la diversité floristique avec les mesures antiérosives

Tableau 19 : Comparaison de l'efficacité des techniques de récupération des terres dégradées

	ANNEES		
	2008	2009	2010
PLUVIOMETRIE (mm)	1050	1000	1243
TEMOIN (g/ms)	282	259,25	258,25
CORDON PIERREUX (g/ms)	352,87	416,15	419,96
ZAI FORESTIER (g/ms)	410,	517,14	522,24

Source: Yaméogo T., 2012

Entre 2008 et 2009 on a enregistré une hausse de la productivité en matières sèches de 26,05% pour le zaï forestier et de 17,93% pour le cordon pierreux contre une baisse de 8,07% pour le T. Les variations n'ont cependant pas été sensibles entre 2009 et 2010.

✚ Effet des aménagements sur la production du sorgho

Il ressort des résultats sur 3 ans les observations suivantes :

- Par rapport au témoin, les cordons pierreux induisent une baisse de rendement. Ceci montre que la disponibilité de l'eau dans le sol pour l'alimentation des plants, n'a pas été un facteur limitant de la croissance et du développement du sorgho ;
- Par rapport au témoin, Les mesures antiérosives, notamment le zaï agricole et le zaï avec cordon pierreux, ont eu un impact très positif sur le développement et la production du sorgho,
- Par rapport au zaï agricole, le zaï avec cordon pierreux entraîne une baisse de rendement. Dans les conditions pluviométriques de la zone, l'humidité du sol provoquée par les cordons pierreux ne favorise pas une bonne croissance du sorgho.
- De même, l'excès d'eau liée à la pluviométrie de façon générale crée les mêmes effets. Ceci est observé en comparant le rendement de 2009 (1000 mm) et 2010 (1254 mm)
- L'effet induit par le Zaï est lié à l'apport de la matière organique.

Ainsi, dans cette zone l'utilisation des cordons pierreux comme technique de récupération des terres dégradées semble superflue. L'association de la fumure organique est une condition sine qua non pour une gestion efficace de la fertilité des sols.

6.4. Recommandations

- **La sensibilisation de la population des villages riverains du cours d'eau :**

La tenue de plusieurs rencontres de concertation est nécessaire pour sensibiliser la population.

Ces rencontres doivent réunir tous les producteurs riverains du cours d'eau, les autorités coutumières et la communauté religieuse. Il faut sensibiliser sur la question de la dégradation des berges surtout en insistant sur leurs causes et leurs conséquences.

Ces rencontres doivent permettre aux usagers de prendre l'engagement de préserver le cours d'eau pour l'avenir. Il faut arriver à la prise de décision consensuelle de la population de protéger les berges.

- **L'organisation de la population pour entreprendre des actions de protection :**

Il est nécessaire que chaque communauté villageoise s'organise en mettant en place un comité de protection des berges. Ces différents comités doivent être assistés par le Comité Local de l'Eau du Bassin du Kou. Ces comités doivent comprendre les différents utilisateurs du cours d'eau (agriculteurs, éleveurs, pêcheurs, etc.) et aussi les représentants coutumiers. Ils comportent aussi une commission de surveillance. Ils doivent élaborer un règlement pour la protection des berges du cours d'eau. Les règles

de protection des berges sont d'abord expliquées et discutées entre tous les utilisateurs du cours d'eau et les propriétaires terriens. Il faut s'assurer qu'il y a un accord de tous sur ces règles de protection des berges. Les comités de protection des berges doivent être formés pour son bon fonctionnement. Ces comités de protection des berges doivent être connus par les autorités administratives au niveau départemental et provincial. De même, le règlement élaboré par le comité doit être connu de ces autorités.

- **La mise en place de pépinières villageoises**

Pour reboiser les berges, il faut produire beaucoup de plants en pépinière. Il est nécessaire de former les membres des comités et d'autres personnes sur les techniques d'installation de pépinières et sur la technique de plantation d'arbres. Après la formation, les comités seront accompagnés pour mettre en place des pépinières villageoises comportant les espèces d'arbres identifiées à planter.

- **Le reboisement des berges en trois (3) bandes**

Le reboisement se fait en 3 bandes en utilisant des espèces d'arbres différentes. Pour cela, il faut faire une délimitation de l'emplacement de ces bandes de plantation en faisant un piquetage.

La première bande est appelée bande protectrice ou fixatrice car elle est la plus proche du cours d'eau. Elle couvre une largeur de 15 m tout au long du cours d'eau. Cette bande est plantée avec des espèces d'arbres épineux comme *Acacia nilotica* qui fixent bien les berges pour éviter leur éboulement ou le bambou. On peut aussi utiliser des espèces d'arbres qui supportent l'eau et résistent aux inondations comme *Nauclea latifolia* ou *Sarcocephaluse sculentus*, appelé *Gouingaen* mooréou le *Dichrostachys glomerata*. Dans cette bande, les arbres sont plantés en ligne en laissant 3m entre les lignes et 3 m entre les arbres d'une même ligne.

La deuxième bande ou bande fruitière est espacée de la première de 10 m. Elle est large de 60m et est plantée d'arbres fruitiers comme les manguiers, les goyaviers, etc. Dans cette bande, les arbres sont plantés en lignes espacées entre elles de 10 m. Il y a aussi 10 m entre les arbres d'une même ligne.

La troisième bande ou bande de bois de chauffe est séparée de la deuxième de 10 m. Elle est plantée d'arbres qui grandissent vite et qui donnent du bois pour les besoins des familles en bois de chauffe. C'est par exemple le *Cassia siamea* qui est planté sur une largeur de 25 m et en lignes séparées de 4 m et 4 m entre les arbres de la même ligne.

Au total, c'est une bande large de 100 m qui est protégée tout au long des berges du cours d'eau.

Cette opération de reboisement doit être répétée chaque année par les villageois pour couvrir toute la longueur du cours d'eau. Ils peuvent reboiser 4 à 5 km de berges par an. Ce qui nécessite la production d'environ 5000 plants dans les pépinières.

- L'application stricte de l'article 77 de la RAF
- La restauration du couvert végétal avec des espèces utilitaires et certaines espèces qui colonisent très rapidement les sites d'implantations et/ou fixe bien le sol sur l'ensemble dans bassin versant
- la formation des agriculteurs et éleveurs en techniques de fauchage et de conservation du foin et en techniques de DRS/CES
- La sensibilisation et la formation des populations en technique de lutte contre les feux et à l'utilisation préventive de feux précoces ou feux d'aménagement.

Conclusion partielle

Le Burkina Faso dispose d'un cadre législatif et institutionnel bien fourni en matière de Gestion Durable des Terres. Cependant, la mise en œuvre des différents textes relatif à la GDT est lente ou quasi inexistante. Face aux contraintes qu'engendre la dégradation des sols par l'érosion hydrique, les paysans du bassin versant du Kou réagissent en adoptant selon leur logique une série de stratégies en vue de s'adapter. Ces stratégies sont entre autres la jachère naturelle, le buttage, le billonnage, la rotation et l'assolement des cultures. Face aux nombreuses limites de ces stratégies endogènes le taux d'adoption de ces technologies demeure néanmoins faible. Il est donc nécessaire de revoir l'approche d'intervention pour garantir une gestion durable des terres dans le bassin versant du Kou.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant du Kou se trouve dans la zone sud soudanienne du Burkina Faso, caractérisée par des conditions biophysiques et humaines favorables à l'agriculture. Le milieu d'étude est caractérisé par un relief peu contraignant, une pluviométrie annuelle moyenne supérieure à 900 mm, des sols tropicaux à dominance ferrugineux, une population en pleine croissance, dynamique et majoritairement agricole. Ainsi, les activités agricoles et pastorales déterminent l'économie du milieu d'étude. A l'instar de tous les bassins du Burkina, le bassin versant du Kou a toujours subi les effets de la variabilité climatique et de la dynamique d'occupation des sols. La variabilité climatique se traduit par une alternance de périodes sèches et humides. Elle se traduit également par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes avec notamment une multiplication de l'érosion hydrique.

L'approche méthodologique de la présente recherche a été construite autour d'une méthodologie intégrée portant sur le calcul des indices de pluie extrême, l'analyse fréquentielle des pluies extrêmes, la Télédétection, les SIG, la Cartographie, des outils d'analyse de la dynamique d'occupation des sols aux moyens des programmes "PontiusMatrix22" et "Intensity Analysis02" de Aldwaik et de Pontius et d'enquêtes socioéconomiques.

Les différents paramètres climatique, topographique, pédologique et d'occupation des sols ont permis de cartographier la vulnérabilité des sols par une analyse multicritère. La cartographie des zones à l'érosion hydrique du bassin versant du Kou a permis de distinguer trois classes de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique. Les zones à faible vulnérabilité couvrent 19,1 % du secteur d'étude, les zones à moyenne vulnérabilité 55,49 % et celles à forte vulnérabilité 24,69 %. Ainsi les classes moyenne et forte intéressent-elles 80,18 % du bassin versant. Leur vulnérabilité est due, pour l'essentiel, à une forte pression anthropique, à caractère agricole, qui provoque la réduction du couvert forestier au profit des cultures. Les caractères des sols et des formations superficielles contribuent à l'efficacité des processus d'érosion sur les terres agricoles. Ces résultats montrent que la première hypothèse de cette recherche qui stipule que « les sols du milieu d'étude sont à un niveau élevé de dégradation » est confirmée

De l'analyse de l'évolution des indices pluviométriques au cours des 60 ans d'observation, il ressort qu'au niveau du bassin versant, le total annuel des pluies (PRCPTOT) et les jours humides consécutifs (CWD) ont connu une baisse tandis que les jours secs consécutifs (CDD), la hauteur maximale des précipitations d'un jour (Rx1day), le cumul maximal des précipitations de 5 jours (Rx5day), les jours très pluvieux (R95) et les jours extrêmement pluvieux (R99p) ont connu une hausse. Les programmes

“PontiusMatrix22” et “Intensity Analysis02” de Aldwaik et de Pontius ont abouti à la mesure des intensités des changements de l’occupation des sols (en %) et leurs vitesses sur les deux intervalles de temps (1987-2002 /2002-2017). Les résultats montrent une forte régression des formations naturelle et une augmentation de superficie de certaine unité comme les zones de culture, les zones d’habitation et les sols nus. Toutefois une telle dynamique de l’occupation des sols surtout dans un contexte de l’augmentation des pluies extrêmes ne peut qu’amplifier la dégradation de l’environnement et aussi de l’activité érosive avec une diminution des rendements agricole.

Ce qui confirme la deuxième hypothèse de cette recherche qui stipule que « l’évolution des évènements pluviométrique extrêmes et la dynamique d’occupation des sols contribuent fortement à la dynamique érosive dans le bassin versant du Kou ».

Des effets induits de l’érosion hydrique, il ressort que les manifestations les plus visibles de ces effets sont perceptibles à tous les niveaux dans le bassin versant et inquiètent les populations. Elle impact aussi bien le milieu physique que le milieu humain. Pour ce qui est de la production de sédiment, les tendances obtenues dépendent du scénario utilisé. Sous l’effet des fluctuations climatiques seules, on constate une baisse de production. Cela s’explique par la baisse de l’écoulement de surface due à la diminution de la précipitation et à l’augmentation de l’évapotranspiration réelle. En ce qui concerne l’effet des scénarii d’occupation des sols seuls, la production moyenne annuelle de sédiments a connu une augmentation, par rapport à celle de l’occupation des sols de référence (2017). Aussi, La baisse des rendements agricole revient le plus souvent au nombre des dégâts causé par l’érosion hydrique cité par les paysans du bassin versant. En effet 93 % de la population enquêté pense que l’érosion occasionne la baisse de leur rendement agricole et 22 % disent que l’érosion entraine l’envasement du Kou. Nous pouvons conclure à cet effet que l’hypothèse trois qui stipule que l’érosion des sols engendre des effets sociaux et environnementaux dans le bassin versant du Kou est vérifié.

L’analyse de la perception de la population locale a montré que la majorité de celle-ci constatent un changement au niveau du climat. Les perceptions paysannes des changements climatiques corroborent les observations météorologiques et la littérature sur la crise climatique. Ces changements perçus au niveau des paramètres pluviométriques et thermiques sont diversement appréciés. Si certaines opinions corroborent avec le constat scientifique, d’autres par contre sont contraires aux résultats des analyses météorologiques. Outre les phénomènes climatiques, le paysan perçoit bien les problèmes afférant à l’érosion et à la restauration de la fertilité des sols. Ces perceptions amènent les paysans à développer des stratégies endogènes de gestion durable des terres pour réduire leurs vulnérabilités. Il s’agit entre autre de : la jachère naturelle, le buttage, le billonnage, les cordons pierreux, le zaï, l’assolement et la rotation des

cultures etc. Toutes ces stratégies ont montré leurs limites dans un contexte de poussée démographique. Ceci confirme la quatrième hypothèse qui stipule que « des techniques endogènes sont développées pour faire face à l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant du Kou ».

En somme, toutes les quatre hypothèses de cette recherche sont totalement confirmées. Face à tous les problèmes engendrés par l'érosion des sols, il est indispensable de promouvoir la gestion durable des terres dans le bassin versant du Kou. L'approche d'intervention doit s'inscrire dans le temps pour avoir des résultats durables. Cette recherche pourrait servir de base pour l'élaboration des stratégies de développement du secteur agricole dans le bassin versant. Sur le plan scientifique, les investigations méritent d'être poursuivies pour une gestion durable des terres, gage d'une sécurité alimentaire au Burkina.

Limites et perspectives de recherche

Le processus méthodologique ayant permis d'analyser la vulnérabilité des sols à l'érosion conduit à une meilleure compréhension de la distribution spatiale de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Kou. Toutefois, ce travail constitue une première étape vers une estimation plus précise de cet aléa. Il convient d'en énumérer les limites et dégager des perspectives pour les recherches futures. Les mesures en parcelle expérimentale et/ou les mesures effectuées à l'exutoire de bassins versants n'ont pas été faites dans cette thèse pour les raisons suivantes :

- Les coûts d'installations et d'entretien élevés des parcelles expérimentales ;
- Le suivi pendant une longue durée pour saisir les événements exceptionnels responsables des plus grandes pertes en terre ;
- La nécessité d'un grand nombre de répétitions pour tester les risques de ruissellement sous divers états de surface ;
- L'extrapolation spatiale qui ne peut pas se baser sur des études locales.

Les perspectives qui s'ouvrent à la suite de cette recherche sont relativement vastes. Les travaux peuvent se poursuivre sur le bassin avec l'installation de sites pilotes afin de disposer de mesures de terrain pour calibrer et valider au mieux le modèle. Ces mesures telles que des hauteurs de pertes en sols permettront d'affiner les indices déterminés à dire d'expert et de coupler des valeurs de terrain à un niveau de sensibilité. En effet, pour le moment, la validation s'est tournée essentiellement vers une interprétation visuelle sur le terrain et d'images satellites de haute résolution ainsi que par quelques relevés **in situ**.

Le second axe de recherche tend vers l'intégration de nouveaux facteurs contribuant au processus d'érosion. Ces derniers traitent de la morphologie du terrain telle que les courbures horizontales et de profils, les surfaces drainées cumulées, ou encore les pistes non revêtues créées par l'action de l'homme. L'intégration de ces paramètres permettrait d'améliorer sensiblement les précisions spatiale et qualitative du modèle. La poursuite de ce travail pourrait aussi s'orienter vers une approche plus dynamique. Avec l'intégration du facteur climatique, la variabilité des précipitations pourrait s'exprimer selon une saison sèche ou humide.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ackerley D., Booth B. B., Knight S., Highwood E.J., Frame D.J., Allen M.R., Rowell D.P., 2011.** Sensitivity of Twentieth-Century Sahel Rainfall to Sulphate Aerosol and CO₂ Forcing. *Journal of Climate*, 24(19): 4999-5014.
- AEDE., 2004.** Rapport d'enquête sur l'évaluation des ressources naturelles et humaines. Mission FNPP sur le site pilote n°1 au Burkina Faso: Le Bassin Hydrographique du Kou. Volume II. Janvier 2004.
- Agoïnon N., 2006.** Esquisse morpho dynamique d'un bassin versant du cours moyen de l'Ouémé: cas du bassin versant de Tèwi. Mémoire de DEA en dynamique des Ecosystèmes et Aménagement du Territoire. FLASH / UAC, 69 p.
- Ait Fora A., 1995.** Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments. Thèse de PhD. en télédétection, université de Sherbrooke, Québec, Canada, 251 p.
- Ake GE, Kouadio BH, Adja MG, Ettien JB, Effebi KR, Biémi J. 2012.** Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo*, 6: 23-42pp.
- 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* (Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987). IAHS Publ. 168p
- Albergel J., Valentin C., 1988.** Sahélisation d'un petit bassin versant soudanien : Kognéré-Boulsa au Burkina-Faso. In : Bret B, éd. Les hommes face aux sécheresses, Nordeste brésilien-Sahel africain. Paris : EST/IHEAL, coll. Travaux et Mémoires 42 : 179-91.
- Aldwaik S.Z., Pontius J. R.G., 2012.** Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landscape and Urban Planning*, 106 : 103-114.
- Alila, Y. 1999.** A hierarchical approach for the regionalization of precipitation annual maxima in Canada. *J. Geophys. Res.* 104(D24) 31645–31655.
- Amani A., Lebel T. 1998.** Relationships between point rainfall, average sampled rainfall and ground truth at the event scale in the Sahel. *Stochastic Hydrol. Hydraul.* 12, 141–154.

Ambroise Bruno 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles / Bruno Ambroise. - Ed. a 2-a. - Bucaresti : Editura HGA, Bibliogr. ISBN 973-98954-2-5, 206p.

Arnold J.B., Wall G., Moore N., Baldwin C.S., Shelton U., 1989. « Fiche technique: L'érosion du sol - Causes et Effets », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculture et Affaires. 5p

Ardoin B.S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 440p.

Arnold, J.G., Srinivasan, Muttiah, R.S., Williams, et J.R. 1998. « Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. » *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34: 73-89.

Arouna O., 2012. Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la Commune de Djidja au Bénin : implications pour l'aménagement du territoire. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 246p.

Arouna, O., Toko, I., Djogbenou, C. P. et Sinsin B. 2011. Comparative analysis of local populations' perceptions of socio-economic determinants of vegetation degradation in soudano-guinean area in Benin (West Africa). *In International Journal of Biodiversity and Conservation*, 3 (7), pp. 327-337.

Awotwi, Alfred, Francis Yeboah, et Michael Kumi. 2014. « Assessing the impact of land cover changes on water balance components of White Volta Basin in West Africa ». *Water and Environment Journal*, Promoting sustainable solutions, .
<https://doi.org/10.1111/wej.12100>.

Barima Y. S. S., Barbier N., Bamba I., Traoré D., Lejoly J., Bogaert J., 2009. Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. *Bois et forêts des tropiques*, 299 (1) : 15 - 25

Bazongo., B.A., 2006. Etude des pertes d'eau par évapotranspiration des groupes de cultures et des formations forestières en contre-saison dans le bassin versant du Kou, dans l'Ouest du Burkina Faso. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso - Institut de Développement Rural: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 61.

Beauchemin C., Schoumaker B., 2005. Migration to cities in Burkina Faso: Does the level of development in sending areas matter? *World Development*, 33(7): 1129-1152.

Begou, Jamilatou Chaibou, Seifeddine Jomaa, Sihem Benabdallah, Pibgnina Bazie, Abel Afouda, et Michael Rode. 2016. « Multi-Site Validation of the SWAT Model on the Bani

Catchment: Model Performance and Predictive Uncertainty ». *Water* 178 (8): 1-23.
<https://doi.org/10.3390/w8050178>.

Bergaoui M. et Alouini A. 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sècheresse*, vol. 12, n° 4, p. 205-213.

Belemviré A, Maïga A, Sawadogo H, Sawadogo M, Ouédraogo S. 2008. Evaluation des impacts biophysiques et socio-économiques des investissements dans les actions de gestion des ressources naturelles au nord du plateau central du Burkina Faso. Rapport de synthèse, étude Sahel, Ouagadougou, 94p.

Benyahy L., Anik D., Daniel C., Dan D. et André H., 2004. Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada". Rapport de recherche. 67p

Bernier B., 1992. Introduction à la macroéconomie. Paris, Dunod, France, 217p.

Biasutti M., 2013. Forced Sahel Rainfall Trends in The CMIP5 Archive. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 118(4), 1613-1623.

Baudoin. M. A., 2010. L'adaptation aux changements climatiques au sud du Bénin: Une analyse de la politique internationale et des besoins locaux ; *GeoEco-Trop.*, 2010, 34 : 155 – 169.

BIAOU, C. F. 2006. Monographie de la Commune de Lalo. Cabinet « Afrique Conseil », Cotonou, 68 p.

Biesbrouck B., Wyseure G., Van Orschoven J., Feyen J., AVSWAT 2002. Katholieke Universiteit Leuven (K.U.Leuven) – Laboratory for Soil and Water Management (LSWM)

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. et Wisner, B. 1994. À risque : aléas naturels, vulnérabilité des personnes et catastrophes. Londres : Routledge 471p.

Bollinne A., Rosseau P., 1978. L'érodibilité des sols de Moyenne et Haute Belgique Utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte de sol. Bulletin de la Société géographique de Liège, N° 14, 14e année, avril 1978, pp. 127-140

Boughalem M., Mazour M., Grecu F., Abdellaoui A., Hamimed A., 2013. Evaluation par analyse multicritères de la vulnérabilité des sols à l'érosion : cas du bassin versant de l'isser – tlemcen – Algérie, in *Analele University Bucuresti Geografie/Annals of the University of Bucharest – Geography Series*. 23p

Boulain N., Cappelaere B., Séguis L., Gignoux J., Peugeot C., 2006. "Hydrologic and land use impacts on vegetation growth and NPP at the watershed scale in a semi-arid environment". *Reg Environ Change*. Vol. 6, pp. 147-156.

Bou R., Girard M.C., Shaban A., Khawle M., Faour G., Darwish T., 2001. Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, vol. 2, n° 2, pp. 79-90.

BOUNDJA Claver 2014 : Recherche scientifique et innovation technologique en Afrique : une approche systémique, *Revue CAMES, Nouvelle série, Sciences Humaines*, N°002-1er semestre, p. 173 à 182, 2014.

Carbonnel J. P., Hubert P., 1992. Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Remise en cause de la stationnarité des séries. In: *L'aridité, une contrainte au développement, caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés* (ed. par M. G. E. Le Floch, A. Cornet et J.-C. Bille), 37-51. ORSTOM, Collection Didactiques, Paris, France.

Casenave A, Valentin C. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. Paris: ORSTOM, 229 p. (Didactiques). ISBN 2-7099-0984-7. ISSN 1142-2580.

Cunnane C. 1989. Statistical distributions for flood frequency analysis, WMO publication N° 718, Genève.

Cuter S.L. 1996. Vulnérabilité aux risques environnementaux. *Progrès en géographie humaine*, 20 (4) (1996), pp. 529 - 539, [10.1177/030913259602000407](https://doi.org/10.1177/030913259602000407)

Collins J. M., 2011. Temperature Variability over Africa. *J. Clim.* 24(14), 3649–3666.
doi:10.1175/2011JCLI3753.1

Collinet J., Valentin C., 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle: Nouvelles perspectives: applications agronomiques. *Cah. ORSTOM, série Pédologie XVII(4)*, 283-328.

Commission Européenne., 2006. Profil Environnemental du Burkina Faso. Rapport Final 131p

Comoss E.J., Kelly D.A., 2008. *Erosion*, in *Encyclopedia of Ecology*, S.E. Jorgensen and B. Fath, Editors. 2008, Elsevier B.V.: Amsterdam. p. 1403-1407.

Conseil des productions végétales du Québec inc., 2000 «Guide des pratiques de conservation en grandes cultures », Réalisé en partenariat: Entente auxiliaire Canada Québec pour un environnement durable en agriculture; CPVQ; FPCCQ; MAP AQ; MENV; ACe., Saint-Hyacinthe, Document en 7 modules et 34 feuillets, 520 p.

Conway D., Persechino A., Ardoin-Bardin S., Hamandawana H., Dieulin C., Mahé G., 2009. Rainfall and Water Resources Variability in Sub-Saharan Africa during the Twentieth Century. *J. Hydrometeorol.* 10(1), 41–59.

- Creutin J.-D., Obled C. 1982.** Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparaison. *Water Resour. Res.* 18(2), 413–431.
- Delhomme, J. P. 1978.** Application de la théorie des variables régionalisées dans le domaine des sciences de l'eau. *Bull. du BRGM (2ème série) Session III, 4*, 341–375.
- De Vente J., Poesen J., Verstraeten G., 2005.** « The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain », *Journal of Hydrology*, 305: 63-86.
- DGAHDI., 2018.** Situation de référence des terres dégradées et de la CES au Burkina, rapport définitif, Ministère de l'agriculture et des aménagements hydrauliques, 154p
- Diallo M., Wellens J., Dakouré D., Compaoré N. F., 2006.** Promouvoir des approches innovantes de recherche développement en matière d'eau: l'expérience du projet Gestion de l'Eau (GEeau) dans le bassin du Kou au Burkina Faso. (Note de Capitalisation).
- Dimon O. R., 2008.** Adaptation aux changements climatiques : perceptions, savoirs locaux et stratégies d'adaptation développées par les producteurs des Communes de Kandi et de Banikoara, au Nord du Bénin. Thèse d'Ingénieur Agronome, Faculté des Sciences Agronomiques, université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 130 p.
- Délaite., Pastor., 1997.** Manuel des techniques de conservation des eaux et des sols (CES) au Sahel edition PRECONS. Programme régional de reboisement et de conservation des Sols au sahel 345p.
- Délusca K., 1998.** Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Equation Universelle de Perte de Sol, assistée d'un Système d'Information Géographique : Le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti. Thèse de maîtrise, Moncton, 1998, 110p.
- Demon, A. 1991.** Activités humaines et dégradation de l'environnement dans la Circonscription Urbaine de Kandi. Mémoire de Maîtrise de Géographie, FLASH/UNB, 101 p.
- Dipama J. M., 1997.** Les impacts du barrage hydroélectriques sur le bassin versant de la Kompienga, thèse de doctorat, Université de Bordeaux III, Bordeaux, France, 297 p.
- Dipama J. M., 2016.** Changement climatique et agriculture durable au Burkina Faso : stratégies de résilience basé sur les savoir locaux, rapport d'étude, 36 p.
- Dossou E. A., 2017.** Dégradation des terres agricoles dans les communes de dassa-zoume et de glazoue au Benin : déterminants et implications socio-économiques, thèse de doctorat unique, Environnement et Société. Université d'Abomey Calavi, 365p.
- Downing, T.E., Aerts, J., Soussan, J., Barthelemy, O., Bharwani, S., Ionescu, C., Hinkel, J., Klein, R.J.T., Mata, L.J., Martin, N., Moss, S., Purkey, D. and Ziervogel, G. 2006.**

Integrating social vulnerability into water management. SEI Working Paper and Newater Working Paper No. 4. Oxford: Stockholm Environment Institute, 38p.

Duggue P., 1994. Les techniques d'amélioration de la production agricole en zone soudano sahélienne. Manuel à l'usage des techniques du développement rural élaboré au Yatenga. CIRAD, 209 p

ELD Initiative., UNEP., 2015. L'économie de la dégradation des terres en Afrique: les bénéfices de l'action l'emportent sur ses frais; 40p.

El Garouani A., Chen H., Lewis L., Triback A., Abahrour M., 2008. « Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au Nord-Est du Maroc », *Téledétection*, vol. 8, n° 3, p. 193-201

Elhafid D, Akdim B. 2018. Quantification de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrée dans un SIG. Cas du bassin versant de l'oued isly (Maroc Oriental). *European Scientific Journal*, **14**(5). p373.

Elodie R., 2014. Les risques de pertes en terre et en eau dans le bassin versant de la Doubégué (Burkina Faso): pour une gestion intégrée. Thèse de doctorat de géographie, Université Michel de Montaigne – Bordeaux 3 École Doctorale Montaigne-Humanités, ED 480 Laboratoire ADES : UMR 5185 CNRS-Université de Bordeaux Laboratoire de Géographie Physique Appliquée (Bordeaux) 541p.

Fangnon Bernard, Tohozin Antoine Yves, Guedenon Patient et Edorh A. Patrick. 2012. Conservation et accumulation des métaux lourds dans les produits agricoles. *Journal of Applied Biosciences* 57: 4168– 4176 ISSN 1997–5902 ; 9p.

FAO., 1990. Aménagement et exploitation des forêts pour le ravitailement de Ouagadougou en bois de feu, Burkina Faso: Conclusion et recommandation du projet: PNUD/FAO/IBKF/85/011, rapport tenninal, 89 p.

FAO., 2003. Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. Rome 2003, 21 p

FAO., 2016. Déclaration d'Abuja sur les engrais au cadre de gestion durable des sols pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle en Afrique à l'horizon 2030: Stimuler les sols africains, Partenariat Mondial Sur Les Sols. 2016, Rome. 16p.

Fondation DARA International 2013. Indice de réduction des risques (RRI) en Afrique de l'ouest Analyse des conditions et des capacités pour la réduction des risques de catastrophe, 2013, 234p.

Foth H. D., 1991. Fundamentals of soil science: John Wiley and Sons, Inc.382p

- Frappart F., Hiernaux P., Guichard F., Mougin E., Kergoat L., 2009.** Rainfall Regime Across the Sahel Band in the Gourma Region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375: 128–142.
- Garen D., Woodward D., Geter F., 1999.** « A user agency's view of hydrologic, soil erosion and water quality modelling » *Catena*, 37: 277-289.
- Gansaonre., 2018.** Dynamiques territoriales à la périphérie du parc w au Burkina Faso, thèse de doctorat unique université Ouaga I Professeur Joseph KI ZERBO, 328P
- Gassman, Philip, Sadeghi M. Ali, et Srinivasan Raghavan. 2014** s. d. « Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights ». *Journal of Environmental Quality* 42: 1-8. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.11.0466>.
- Gombert P., 1998.** Synthèse sur la géologie et l'hydrogéologie de la série sédimentaire du sud-ouest du Burkina Faso (Rapport technique), 76. Bobo Dioulasso, Burkina Faso: Programme RESO, IWACO-BURGEAP.
- Grouzis M., 2012.** Dégradation des écosystèmesin: l'eau au cœur de la science, IRD Editions, 2012, 162p.
- Habdoul H. Z., Boubacar M.K., Adam T., 2016.** Les systèmes de productions agricoles au Niger face au changement climatique : défis et perspectives. *Int. J.Biol. Chem. Sci.*, 10(3): 1262-1272. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i.3.28>.
- Hein., 1995.** La régénération de l'espace hydro-pastoral au sahel, une étude de l'effet de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso, thèse de doctorat, Université Agronomique de Wageningen, Pays Bas, 250p
- Hilborn D., 1996.** «Fiche technique: Lutte contre l'érosion en ravin », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculture et Affaires Rurales, Guelph, 10 p.
- Honlonkou, N. A. (1999):** Impact économique des techniques de fertilisation des sols : cas de la jachère Mucuna au Sud du Bénin. Thèse de doctorat de 3è cycle en sciences économiques, CIRES, Université de Cocody-Abidjan, 187 p.
- Hosking J. R. M., Wallis, J. R. Wood E. F. 1985.** An appraisal of the regional flood frequency procedure in the UK flood studies report. *Hydrol. Sci. J.* 30(1), 85–109.
- Houédjissin R. C. 2000.** Impacts environnementaux des modes de communalité et de gestion des terres dans la sous-préfecture d'Agbangnizoun. Mémoire de DEA de Géographie, EDP/FLASH, UAC, Abomey-Calavi, 91 p.
- Houdenou C., 1999.** Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide, diagnostic et modélisation. Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne. UMR 50 80 du CNRS, climatologie de l'espace tropicale, 341 p.

Houngbo, N. E. 2002. Agriculture durable au Benin ; Une question d'accès aux ressources, Dakar-Yoff, Senegal, Coraf Action N°25, pp. 1112.

Hountondji Y.C., 2008. Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Thèse de Géographie, Faculté des Sciences, Université de Liège, 153 p.

Hountondji, Y.C., Longueville F., Ozer P., 2011. Trends in Extreme Rainfall Events in Benin (West Africa), 1960-2000. Proceedings of The 1st International Conference On Energy, Environment and Climate Change, August 26-27, 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam.7 P.

Hubert P., Carbonnel J. P., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques, application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. J. Hydrol. 110(3-4), 349-367.

Huon S., Bellanger B., Bonté P., Podwojewski P., Girardin C., Valentin c., Rouw A., Velasquez F., Bricquet J.P., Mariotti A., 2005 « Monitoring soil organic carbon erosion with isotopic tracers, two case studies on cultivated tropical catchments with steep slopes (Laos, Venezuela) », In Roose E., et Stewart B.A. « Soil Erosion and Carbon Dynamics », CRC Press, Boca Raton, Florida, Chapitre 20, pp. 30 -322

IPCC., 2007. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (S. Solomon D. Qin M. Manning M. Marquis K. Averyt, M. M. B. Tignor H. LeRoy Miller et al., Eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press. 989p.

INSD., 2008. Recensement général de la population et de l'habitat de 2006. Résultats définitifs. Ministère de l'Economie et des Finances. 413p.

Kasperson, R. E., Dow, K., Archer, E. Caceres, D., Downing, T., Elmqvist, T., Eriksen, S., Folke, C., Han, G., Iyengar, K., Vogel, C., Wilson, K., and Ziervogel, G. 2005: Vulnerable people and places, in: Ecosystems and Human Well-being: current state and trends, Hassan, R., Scholes, R., Ash, N., 1. Island Press. Washington D. C., pp143-164.

Karen O'Brien, Siri Hallstrom Eriksen, Lynn Nygaard, 2007. Pourquoi différentes interprétations de la vulnérabilité sont importantes dans les discours sur le changement climatique. Politique climatique 7(1) DOI : 10.3763/cpol.2007.0706, pp73-88

Karl T.R., Easterling D.R., 1999. Climate extremes: selected review and future research directions. *Climatic Change*, 42: 309 – 325.

Kabore O., 2013. Dynamique de l'utilisation des terres dans les écosystèmes de savane et systèmes agraires du Bassin versant de la Kompienga (Burkina Faso). Thèse de doctorat unique Université Ouaga I Professeur Joseph KI ZERBO, 281P.

- Kamagaté 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 de Doctorat Université Montpellier II, Sciences et Techniques, Montpellier, France, 320 p.
- Karambiri H., Olivier R., 2003.** Réponse hydrologique et érosion hydrique d'un petit bassin versant pastoral sahélien (Burkina Faso) Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. no. 278, 2003.
- Karambiri H., Yacouba H., Sanou D., Diello P., Guilliod M., Mahé G., Paturel J-E., 2005.** « Caractérisation de la réponse hydrologique et de l'érosion hydrique d'un petit bassin versant sahélien : bassin versant de Tougou au nord du Burkina Faso ». *In Conference International AMMA*, Dakar, Christopher Thorncroft and Elisabeth van den Akker, pp 1-5.
- Karambiri H., Yacouba H., Barbier B., Mahe G., Paturel J.E., 2009.** Caractérisation du ruissellement et de l'érosion de la parcelle au bassin versant en zone sahélienne : cas du petit bassin versant de Tougou au Nord du Burkina Faso. *Joint International Convention of 8 the IAHS Scientific Assembly and 37 the IAH Congress*, pp. 1- 2.
- Klein R.J.T., Nicholls R.J., 1999.** Assesment of costal vulnerability to climate change. *Ambio* 28 (2), 182-187.
- Koumassi H., 2014.** Risques hydro climatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la sota à l'exutoire de couberi, thèse de doctorat unique, Environnement et Societé. Université d'Abomey Calavi, 245p.
- Krause A.K., Franks S.W., Kalma I.D., Loughran R.J., Rowan J .S., 2003.** « Multi pararneter fin gerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia », *Catena*, 53: 327- 348.
- Lang, M., Wellens J., et Tychon B. 2011.** « ARCSSWAT manuel d'utilisateur : cas du bassin versant du Kou (Burkina Faso) ». 2011.
- Lambin, E., Gibbs, H., Ferreira, L., Grau, R., Mayaux, P., Meyfroidt, P., Morton, D.C., Rudel, T.K., Gasparri, I. et Munger, J. 2013.** Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. *Global Environmental Change* n° 23(5), pp. 892–901.
- Ledoux Bruno 1994 :** Les études de vulnérabilité dans la cartographie réglementaire des inondations à la Réunion : approche méthodologique, études de cas et réflexion sur leur finalité. In: *Revue de géographie alpine*, tome 82, n°4, 1994. pp. 167-177.
- Liggitt B., Fitcham., R.J., 1989.** «Gully erosion the neglected dimension in soil erosion research » *South African Journal of Sciences*, 85: 18-20.

- Liniger, H.P., Mekdaschi Studer, R., Hauert, C., Gurtner, M. 2011.** Sustainable Land Management in Practice –Guidelines and Best Practices for Sub-Sahara Africa. TerrAfrica, World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT) and Food Agriculture Organisation of the United Nations, 22p
- Lebel T., Ali A., 2009.** Recent Trends in the Central and Western Sahel Rainfall Regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 375(1-2): 52-64.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King, D., 2002.** Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46 (2002) pp. 207-220.
- Lillesand T., Kiefer R., 1994.** Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley, Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 750p.
- Lorenzini G., 2007 :** Etude du bassin d'alimentation des sources de Nasso (Bobo-Dioulasso, Burkina Faso). « Etat des lieux des ressources en eaux souterraines du bassin du Kou ». Mémoire d'ingénieur Civil Géologue. 119p
Université de Liège. Faculté des sciences appliquées.
- Mahé G., Paturel J-E., 2009.** 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geosci.* 341(7), 538–546.
- Marchal J. Y 1979.** L'espace des techniciens et celui des paysans. Histoire d'un périmètre antiérosif en Haute-Volta. In mémoire OSTROM Paris n° 89 245-252
- Marchal J.Y., 1983.** Yatenga, Nord Haute Volta. La dynamique d'un espace rural soudano sahélien. Travaux de documents de l'ORSTOM, Paris, 873 p (+ cartes hors texte).
- Maurizot P. et Delfau M., 1995.** Cartographie de la sensibilité à l'érosion, Province Sud de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM n° R 38660. BRGM : Nouméa, 72 planches.
- McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) 2001.** Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, 1005p.
- Mesrar H, Sadiki A, Navas A, Faleh A, Quijano L, Jamal C. 2015 :** Modélisation de l'érosion hydrique et des facteurs causaux, Cas de l'oued Sahla, Rif Central, Maroc. *Annales de Geomorphologie*, 59(4) : 495 – 514.
- Meylan P. et Musy A. 1999.** Hydrologie fréquentielle. Editions H.G.A Bucarest, 413 pages.
- Mietton M., 1988.** Dynamique de l'interface lithosphère au Burkina Faso : l'érosion en zone de savane. Thèse, doctorat de géographie, Université de Grenoble I, 511 p.
- Mando A., Zougmore R., Zombré N.P., Hien V., 2001.** Réhabilitation des sols dégradés dans les zones semi-arides de l'Afrique sub-sahélienne. In : *La jachère en Afrique tropicale*. C. Floret, R. Pontanier (eds.), Vol. II., John Libbey, Paris, pp. 311-339.

- Marchal J-Y., 1977.** Système agraire et évolution de l'espace au Yatênga (Haute-Volta). *Cahier de l'ORSTOM*, série Sciences humaines, vol. XIV, n° 2 pp. 141-149.
- Mazour M., 2004.** Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser – Tlemcen, Thèse de Doctorat D'Etat, Université de Tlemcen, 184, 131 pp.
- Morsli B., Mazour M., Mededjel N., Roose E., 2004.** Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et de l'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie, *Sécheresse*, vol. 15, no 1, 96-104.
- Min S.K., Zhang X., Zwiers F.W., Hegerl G.C., 2011.** Human Contribution to More-Intense Precipitation Extremes. *Nature*, 470 :378–381.
- Meylan., Musy., 1999.** Hydrologie générale : Analyse fréquentielle. *Annale revue hydrologie*. 19 P
- Mohamed A.B., 2011.** Climate Change Risks in Sahelian Africa. *Regional Environmental Change*, 11(1): 109-117.
- Mugisha S., Tenywa M. M., Burt P. J. A., 2010.** An improved technique for the prediction of optimal image resolution for large-scale mapping of savannah ecosystems. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4 (10): 709-717.
- Mulard M., Groene D., 1961.** Les modes de lutte contre l'érosion du sol en Haute-Volta. *Bois et forêt des tropiques Bois et Forêts des Tropiques*, 79. 7-1679
- Nacro H. B., 2006 :** Aménagement et gestion des ressources fourragères de l'unité n°3 de la forêt classée de Dindéresso. *Projet d'Aménagement Participatif des Forêts Classées de Dindéresso et du Kou*. PAFDK.BKF/007. Mai 2006
- Nacro H. B., 2007 :** Bilan de la mise en œuvre de la pâture contrôlée dans la zone sylvo-pastorale de la forêt classée de Dindéresso, campagne 2006. *Rapport final. Projet d'Appui à la gestion participative des Ressources Naturelles dans la région des Hauts-Bassins (Burkina Faso BKF/02.PAGREN/HBS)* 96p.
- N'Dri B.E., N'Go Y.A., Kadio H.N., Ouattara A., Touré B. et Biémi J. 2008.** Effect of soil slope and cover on runoff and rate soil loss from experimental plots in area of Attécoubé. *European Journal of Scientific Research*, vol. 21, n° 3, p. 459-470.
- Niang D., 2006.** Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le sahel burkinabè, *Ecole polytechnique fédérale de Lausanne*, 167 p.
- Nicholson S.E., Some B., Kone B., 2000.** An Analysis of Recent Rainfall Conditions in West Africa, Including The Rainy Seasons of The 1997 El Nino and The 1998 La Nina Years. *Journal of Climate*, 13 (14), 2628-2640.

- Nikiema A., Ouedraogo S. J., Boussim J., 2001.** Situation de ressources génétiques forestières au Burkina Faso. Note thématique sur les ressources génétiques forestières, in : *Atelier sous-régional FAOI/PGIUI/CRAF sur la conservation, la gestion, l'utilisation durable et la mise en valeur des ressources génétiques forestières de la zone sahélienne* (Ouagadougou, 22-24 sept. 1995).
- OMM., 2009.** Troisième conférence mondiale sur le climat, Nouvelles du climat mondial, 34p.
- Ouarda T.B.M.J., Lang M., Bobée B., Berner J., Bois P., 1999.** Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Rev. Sci. Eau*, 12(1), 155-182
- Ouedraogo b., Kabore O., Kabore M., 2019.** Cartographie quantitative de l'érosion par approche SIGUE/RULSE dans la commune de Karangasso vigué (Burkina Faso) *int. J. Biol. Chem. Sci* 13 (3): 1638 – 1653, June 2019 ISSN 1997 – 342X (online) ISSN 1991 – 8631 (print) 16p.
- Ouédraogo S., 2005.** Intensification de l'agriculture dans le Plateau Central du Burkina Faso: Une analyse des possibilités à partir des nouvelles technologies. Ph.D. dissertation, Université de Groningen, the Netherlands 337p
- Ouédraogo C., (2006)** Synthèse géologique de la région ouest du Burkina Faso (Rapport technique). Bobo Dioulasso, Burkina Faso: Programme VREO, SOFRECOSAWES. 46p.
- Ouédraogo D., Dissa A., Yaro R. B., Koutou., 2006.** Gestion participative et durable des produits forestiers non ligneux des forêts de Dindéresso et de Kou: Analyse socioéconomique des potentialités et des contraintes. PAPDK. Rapport définitif. Ministère de l'Environnement et du cadre de vie 63p.
- Ozer P., Hountondji Y.C., Laminou M. O., 2009.** Evolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop*, 33: 11-30.
- Paturel J.E., Koukponou P., Ouattara F. Laour A. Mahe G., Cres F. N., 2002.** Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XXème siècle. *Sud Sciences et Technologies* 8, 41–49.
- Payet E., Dumas P., Gwenaëlle P., 2011.** Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Volume11 Numéro 3 pp.77-98
- Pettit A.N., 1979.** A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society*. Vol. 28. N°. 2, p. 126{135
- Peterson T.C., Taylor M.A., Demeritte R., Duncombe D.L., Burton S., Thompson F., Porter A., Mercedes M., Villegas E., Semexant-Fils R., Klein-Tank A., Martis A.,**

- Warner, R., Joyette A., Mills W., Alexander L., Gleason B., 2002.** Recent Changes in Climate Extremes in the Caribbean Region. *Journal of Geophysical Research*, 107 (21): 4601.
- Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin C., 2003.** Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *Catena*, 50 : 91-133.
- Poméon, Thomas, Bernd Diekkrüger, Anne Springer, Jürgen Kusche, et Annette Eicker. 2018.** « Multi-Objective Validation of SWAT for Sparsely-Gauged West African River Basins—A Remote Sensing Approach ». *Water* 451 (10): 1-22. <https://doi.org/10.3390/w10040451>.
- Pontius R. G., 2000.** « Quantification error versus location error in comparison of categorical maps », *Photogrammetric engineering and remote sensing*. Vol. 66, n° 8, pp 1011-1016.
- Poesen J., Vandaele K., Van Wesemael B., 1996.** « Contribution of gully erosion to sediment production in cultivated lands and rangelands », *International Association of Hydrological Sciences Publications*, 236: 251-266.
- Reij, C. 1983.** L'évolution de la lutte anti-érosive en Haute Volta: Vers une plus grande participation de la population. Amsterdam: Institute for Environmental Studies, Vrije University. 84p.
- Reij C., 1996.** Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique. Editions Karthala, 260 p
- Reij C., Thiombiano T., 2003.** Développement rural et environnement au Burkina Faso : la réhabilitation de la capacité productive des terroirs sur la partie nord du plateau central entre 1980 et 2001. Rapport de synthèse GTZ, PATECORE, USAID, Ambassade Pays Bas, Ouagadougou, 82 pages
- Renard K.G., Freimund J.R., 1994.** Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287-306.
- Renard K.G., 1997.** *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA agricultural research service, Agriculture handbook number 703, 384 p.
- Rochette R. M., 1989.** Le Sahel en lutte contre la désertification. Leçons d'expériences, CILLS/PAC, 592 p
- Roose E., 1984.** Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical : conséquences pour les méthodes antiérosives. *Machinisme et Agriculture Tropicale*, vol. 87, p. 4-18.
- Roose E.J., 1985.** Dégradation des terres et développement en Afrique de l'Ouest. Communication Colloque International, de Gembloux: 9-11. octobre 1985; « Développement

agricole et conservation du patrimoine naturel du Tiers Monde ». ORSTOM HontpellZer, 30p.

ROOSE E., SARRAILH J-M., 1990 : Erodibilité de quelques sols tropicaux Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles Cah. ORSTOM, sér. Pedol, vol. XXV, no I-2, 1989-90: 7-30

Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M., Morsli B., 1996. Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne", *Ch. Orstom, Seri. Pédol.*, vol XXXVIII, no 2, 289-307.

RESO., 1997. Inventaire des Ressources en eau. Données générales. Rapport final. Tome 2. 264p.

Sauret E., 2013. Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso), thèse de doctorat Université de Liège (ULG) Faculté des Sciences Appliquées - Département ArGEnCo Architecture, Géologie, Environnement et constructions Secteur GEO Géotechnologies, Hydrogéologie, Prospection Géophysique. 215p.

Sadiki A, Bouhlassa S, Auajjar J, Faleh A, Macaire JJ. 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussoua. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, 26: 69–79.

Sanou D.B., 2010. Aménagement des forêts de Dinderesso et du Kou et autoreprésentation des communautés villageoises riveraines. Proposition d'une méthode d'actualisation des coutumes pour une gestion durable des ressources naturelles. Communication, Atelier régional de partage des bonnes pratiques Saly Portudal (Sénégal) 1er -3 juin 2010-05-25 23p

SANOUE P., 2016. Impacts écologiques des programmes de gestion des ressources naturelles sur les terres dans la région Nord du Burkina Faso. Thèse de doctorat en géographie, gestion des ressources naturelles. Université de Ouagadougou, Laboratoire dynamique des espaces et sociétés. Ouagadougou, 391 pages

Scherr, Sara J., 1999. "Soil degradation: a threat to developing-country food security by 2020?," 2020 vision discussion papers 27, International Food Policy Research Institute (IFPRI), 71p.

Schuol, Jurgen, Karim C. Abbaspour, Raghavan Srinivasan, et Hong Yang. 2007. « Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT

hydrologic model ». *Journal of Hydrology* 352 (décembre): 30-49.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025>.

Serpentié G., Tezenas Du Montcel L., Valentin C., 1992. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien, conséquences et propositions. In: L'aridité, une contrainte au développement, caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés (ed. par M. G. E. Le Floch, A. Cornet ; J.-C. Bille), 419-447. ORSTOM, Collection Didatiques, Paris, France.

Serpentié G., Yoni M., Hien V., Abbadie L., Bilgo A., Ouattara B., 2002. Le carbone du sol dans les terroirs des savanes soudaniennes « cotonnières, facteurs et dynamique ». Comm. Au colloque international « sequestration du carbone et érosion », Montpellier, 23-28pp

Stengel P., Gelin S., 1998. Sol: interface fragile, Mieux comprendre : Institut National de la Recherche, ISSN 1144-7605, Editions Quae, 1998, 213p

Sighomnou Daniel. 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Yaoundé : Université de Yaoundé 1, multigr. Th. : Sci.de l'Eau, Université de Yaoundé 1. 289p.

Sogreah., 1993. Notice explicative de la carte hydrogéologique 1:50000 de la région de Bobo-Dioulasso. Etude des ressources en eau souterraine de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso, Ministère de l'Eau, Direction Régionale de l'Eau des Hauts Bassins., Bobo Dioulasso, Burkina Faso. 25p.

Sogreah., 1994. Etude des ressources en eaux souterraines de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso, rapport final texte, 187p.

Sullivan, C.A. and J. Meigh. 2006. Application of the water poverty index at different scales: a cautionary tale. *Water International*, 31(3): 412-426.

Tahiri M., Tabyaoui H., Elhammichi F., Achab M., Tahiri A. Elhadi H. 2017. Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation à partir de modèles empiriques dans le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de La Terre*, 39: 87–101.

Talbi O., Mendas A., Bensaid A., Trache., 2002. Mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi et la quantification de l'érosion hydrique: application au bassin versant de l'Isser (Tlemcen)”, *Sécheresse*, vol. 13, no 3, 175-179.

Tente, B. 2000. Dynamique actuelle de l'état de surface dans le massif de l'Atacora : secteur Perma-Toucountouna, Mémoire de DEA, UNB, FLASH, 83 p.

Toko, I.M. et Da Matha Sant'Anna, M.A. 1999. Evolution de l'utilisation du terroir dans la Sous-Préfecture de Banikoara (Nord-Bénin). *Cahiers agricultures n°8*, pp. 135-141.

- Toko I., 2014.** Facteurs déterminants de la fragmentation des écosystèmes forestiers : cas des îlots de forêts denses sèches de la forêt classée des Monts Kouffé et de sa périphérie au Bénin, thèse de doctorat unique, Environnement et Société. Université d'Abomey Calavi, 235p.
- Traoré F., 2012.** Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège. 195p
- Traoré F., Gombert P., 1997.** Variations des débits interannuels de la source de la Guinguette. Ministère de l'Environnement et de l'Eau Secrétariat Général, Direction Générale de l'Hydraulique des Hauts-Bassins du Burkina Faso. 8p.
- Valentin C., 1994.** Sécheresse et érosion au Sahel. *Sécheresse*. Vol. 5, pp. 191-198.
- Valentin Christian, D'Herbès Jean-Marc. 1996.** Impact of water harvesting variations along a climatic transect in Niger upon productivity and patterns of tiger bush. In : *Banded vegetation patterning in arid and semi-arid environment : ecological processes and consequences for management = Les formations de type "brousse tigrée" des régions arides et semi-arides : processus écologiques et conséquences pour la gestion de l'environnement ;* Paris : ORSTOM ; CNRS, p. 37-38 multigr. Les Formations de Type "Brousse Tigrée" des Régions Arides et Semi-Arides : Processus Ecologiques et Conséquences pour la Gestion de l'Environnement : Symposium, Paris (FRA).
- Valencia N. D., 2006.** Risques naturels, aléa et vulnérabilité mécanique : cas de constructions en maçonnerie vis `à vis des s'séismes et inondations. Thèse de Doctorat, université Marne la Vallée, (2006) 189 p.
- VISSIN E. W., 2001.** Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA 53 p. Université de Bourgogne, Dijon, France.
- Wall GJ, Coote DR, Pringle EA, Shelton IJ. 2002.** RUSLE-CAN Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, N° de la contribution AAC2244F, 117 p.
- Wankpo., 2019.** Aménagements hydro-agricoles et contraintes environnementales dans le bassin versant de la sota Président. Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi. 292P
- Watson, R.T., Zinyoera, M.C., and Moss, R.H. 1996.** Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 857p.

- Wasson R.J., Caitcheon G., Munay A.S., McCulloch M., Quade J., 2002.** « Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of Lake Argyle, north western Australia », *Environmental Management*, 29: 634- 646pp
- Wellens J., Compaoré N. F., 2003.** Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation GEeau, In: Leuven, D.R.A.H.R.H.-H.B.-K.U. (Ed.), Rapport annuel 1. GEeau: Bobo Dioulasso, Burkina Faso, p. 123.
- Wellens J., Compaoré N.F., 2004.** Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation GEeau, In: Leuven, D.R.A.H.R.H.-H.B.-K.U. (Ed.), Rapport annuel 3. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 124.
- Wijngaard J.B., A.M.G. Klein T et KONNEN G.P., 2003.** Homogeneity of 20 century European daily temperature and precipitation series. *Int. J. Climatol.*, 23, 679-692.
- Wellens J., Nitcheu M. N., 2009.** Le périmètre irrigué de la Vallée du Kou: Diagnostic des efficacités hydro-agricole et élaboration des calendriers à l'aide de SIMIS. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques - Direction des Etudes et de la Planification -Direction Régionale de l'Eau des Hauts-Bassins: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 45p
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978.** Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Édit. USDA, vol. 537, 58 p.
- Wolff E., 2006.** Télédétection. Notes de Cours, DESS en Gestion des Ressources Naturelles. AGE-FSA/UAC. Abomey-Calavi, Bénin. 182p.
- Yanogo P. I., 2012.** Stratégies d'adaptation des populations aux changements climatiques autour du Lac Bagré (Burkina Faso). Université d'Abomey Calavi (Benin), Thèse de Doctorat Unique de Géographie, 302 p.
- Yameogo T. J., 2008.** Restauration et réhabilitation du site pilote de Kuinima : caractérisation biophysique. Pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en Gestion Intégrée des Ressources Naturelles Option: Sciences des Sols. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 85p
- Yaméogo A., SOMÉ Y. S. C., Palé S., Sirima B.A., Da D.E.C., 2021.** Application de SIG/RUSLE à l'estimation de l'érosion par ruissellement en nappe dans le bassin versant supérieur de la Sissili (Burkina Faso). *Geo-Eco-Trop.*, 2021, 45, 2: pp 299-310.

Yofe T.J., 2016. Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso. Thèse en cotutelle, Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH, 2iE) / Laboratoire Milieux environnementaux, Transferts et Interactions dans les Hydro systèmes et les Sols (METIS, UPMC): Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) / Université Pierre et Marie Curie (UPMC). Réf: 2iE/2016-08. 260p

Zhang X., Yang F., 2004. *RCLimDex (1.0) User Guide*. Climate Research Branch Environment Canada. Downs view Ontario, Canada.23p.

ZOUGMORE R., 1991. Contribution à l'étude du ruissellement et de l'érosion à la parcelle ; influence des principaux paramètres : précipitation, rugosité du sol, états de surface, humidité du sol en surface. Mémoire de fin d'études, INS-IDR, Université de Ouagadougou, 89 p

ANNEXES

Annexe 1 : Répartition de l'échantillon par village dans le bassin versant du kou

village	Ménages	Populations	taille échantillon
Badara	538	3097	53
Bana	139	756	14
Banakélédaga	346	1670	35
Dafinso	236	1354	23
Dendéresso	112	518	12
Diaradougou	244	1284	25
Doufiguisso	198	1040	20
Kôdara	198	1248	20
Koumi	399	1958	40
Lanfièra	173	932	18
Moami	238	1429	24
Tien	156	1411	16
Toukoro	410	2287	42
Toukoro-Sambla	402	2398	41

Yirwal	137	827	14
TOTAL	3926	22209	397

Annexe 2 : Stations météorologiques

STATIONS	Code AGRHYMET	Longitude	Latitude	Altitude	Nature	Date d'ouverture
BEREBA	200102	-3,68	11,62	291	Poste pluviométrique	1964
BEREGADOUGOU	200153	-4,73	10,75	331	Agrométéorologiques	1970
BOBO-DIOULASSO	200099	-4,3	11,17	432	Synoptiques	1907
FARAKO-BA (AGRO)	200098	-4,33	11,1	405	Agrométéorologiques	1953
KOUKA	200148	-4,33	11,9	326	Poste pluviométrique	1970
KOUMBIA	200101	-3,7	11,23	309	Poste pluviométrique	1964
KOUROUMA	200095	-4,8	11,62	347	Poste pluviométrique	1960
NASSO	200096	-4,43	11,2	339	Poste pluviométrique	1953
ORODARA	200132	-4,92	10,98	523	Poste pluviométrique	1954
SAMO ROGOUAN	200094	-4,93	11,4	380	Poste pluviométrique	1964
SIDERADOUGOU	200136	-4,25	10,68	319	Poste pluviométrique	1955
VALLEE DU KOU	200149	-4,38	11,37	303	Agrométéorologiques	1981

Source :ANAM

Annexe 3 : données hydrométriques

STATIONS	Code AGRHYMET	Longitude	Latitude	Altitude	Nature	Date d'ouverture
BEREBA	200102	-3,68	11,62	291	Poste pluviométrique	1964
BEREGADOUGOU	200153	-4,73	10,75	331	Agrométéorologiques	1970
BOBO-DIOULASSO	200099	-4,3	11,17	432	Synoptiques	1907
FARAKO-BA (AGRO)	200098	-4,33	11,1	405	Agrométéorologiques	1953
KOUKA	200148	-4,33	11,9	326	Poste pluviométrique	1970
KOUMBIA	200101	-3,7	11,23	309	Poste pluviométrique	1964
KOUROUMA	200095	-4,8	11,62	347	Poste pluviométrique	1960
NASSO	200096	-4,43	11,2	339	Poste pluviométrique	1953
ORODARA	200132	-4,92	10,98	523	Poste pluviométrique	1954
SAMO ROGOUAN	200094	-4,93	11,4	380	Poste pluviométrique	1964
SIDERADOUGOU	200136	-4,25	10,68	319	Poste pluviométrique	1955
VALLEE DU KOU	200149	-4,38	11,37	303	Agrométéorologiques	1981

Textures de tous les types de sols présents dans le bassin du Kou

CPCS		BRM	Prof. [cm]	Argile [%]	Limons [%]	Sables [%]
FLC	Lixisols	Ferric Lixisols	0-15	9,80	35,30	54,90
			15-35	25,49	23,53	50,98
			35-64	29,41	29,41	41,18
			64-105	27,45	25,49	47,06
FLIMP	Lixisols	Plinthic Lixisols	0-15	10,78	48,05	41,18
			15-45	25,49	47,06	27,45
FLIP	Lixisols	Profondic Lixisols	0-15	13,73	33,33	52,95
			15-40	38,24	22,55	39,22
			40-80	43,14	29,41	27,45
			80-100	37,25	25,50	37,25
FLIPP	Lixisols	Leptic Lixisols	0-13	13,73	39,21	47,06
			13-32	27,45	50,98	21,57
FLIS	Lixisols	Abruptic Lixisols	0-20	5,88	17,65	76,47
FLM	Lixisols	Profondic Lixisols	sol non-analysé, se référer au sol FRI			
FLTC	Lixisols	Gleyic Ferric Lixisols	0-19	12,745	57,845	29,41
			19-50	31,37	42,16	26,47
			50-77	32,35	34,315	33,335
			77-114	33,33	41,18	25,49
FRI	Lixisols	Chromic Bathiplinthic Lixisols	0-8	27,45	15,69	58,86
			8-40	45,1	17,65	37,25
			40-82	45,1	19,61	35,29
FTM	Lixisols	Rhodic Lixisols	0-15	7,84	17,65	74,51
			15-35	28,43	15,685	55,885
			35-110	39,165	13,725	47,06
FTH	Lixisols	Gleyic Lixisols	sol non-analysé, se référer au sol FRI			
FRM	Ferralsols	Ferralsols	0-20	12,745	15,685	71,57
			20-45	39,22	15,68	45,1
			45-90	35,29	21,575	43,135
			90-125	39,215	13,725	47,06
HPGE	Gleysols	Gleyic Gleysols	0-15	47,06	39,21	13,73
			15-41	45,1	27,45	27,45
			41-77	50,98	37,26	11,76
			77-107	50,98	33,33	15,69
LITH	Arenasols	Petroplinthic Arenasols	trop gravillonnaire, pas d'analyse possible			
PEAAH	Fluvisols	Gleyic Fluvisols	0-19	9,80	39,22	50,98
			19-34	11,76	35,30	52,94
			34-87	45,10	45,10	9,80
			87-125	31,37	50,98	17,65
PEEL	Leptosols	Lithic Leptosols	0-6	5,88	27,45	66,67
			6-11	7,84	19,61	72,55

Annexe 2 Bref aperçu du programme “PontiusMatrix”

Annexe 2.1. Légende des résultats de Intensity Analysis02.xlms

▪ **Interval Level** (niveau de l'intervalle)

- 1- couleur verte : changement annuel est rapide par rapport au changement annuel uniforme,
- 2- couleur rouge : changement annuel est lent par rapport au changement annuel uniforme,
- 3- couleur jaune : intervalle de changement est égale au changement uniforme,
- 4- couleur rose : erreur d'omission,
- 5- couleur grise foncée : erreur de commission,
- 6- couleur noire : gain.

▪ **Category Level Gains** (gains au niveau de la catégorie)

- 1- couleur verte : changement de la catégorie est relativement actif comparé à l'uniforme,
- 2- couleur rouge : changement de la catégorie est relativement dormant comparé à l'uniforme,
- 3- couleur jaune : gain de la catégorie est égal au changement uniforme,
- 4- couleur rose : erreur d'omission,
- 5- couleur grise foncée : erreur de commission,
- 6- couleur noire : gain.

▪ **Category Level Losses** (Pertes au niveau de la catégorie),

- 1- couleur verte : changement de la catégorie est relativement actif comparé à l'uniforme,
- 2- couleur rouge : changement de la catégorie est relativement dormant comparé à l'uniforme
- 3- couleur jaune : perte de la catégorie est égale au changement uniforme,
- 4- couleur rose : erreur d'omission,
- 5- couleur grise foncée : erreur de commission,
- 6- couleur noire : perte.

▪ **Transition Level to n** (transition vers les autres unités d'occupation du sol)

- 1- couleur verte : changement de la catégorie est relativement actif comparé à l'uniforme,
- 2- couleur rouge : changement de la catégorie est relativement dormant comparé à l'uniforme,
- 3- couleur jaune : transition de la catégorie est égale à la distribution uniforme des transitions à travers les zones possibles de cette transition,
- 4- couleur rose : erreur d'omission,
- 5- couleur grise foncée : erreur de commission,
- 6- couleur noire : transition d'une catégorie i vers une catégorie n.

- **Transition Level to m** (transition des autres unités d'occupation du sol vers une unité d'occupation donnée)

1- couleur verte : changement de la catégorie est relativement actif comparé à l'uniforme,

2- couleur rouge : changement de la catégorie est relativement dormant comparé à l'uniforme,

3- couleur jaune : transition de la catégorie est égale à la distribution uniforme des transitions à travers les zones possibles de cette transition,

4- couleur rose : erreur d'omission,

5- couleur grise foncée : erreur de commission,

6- couleur noire : transition d'une catégorie m vers une catégorie j.

Annexe 2.2. Intensités des changements globaux par transition, entre unités d'occupation du sol (1987 – 2002 et 2002 – 2017)

Interval Categories	1987_2002							
	Observed Gross Loss	Intensity of Losses	Uniform change	Uniform Annual Loss	Annual # of pixels positions of hypothesized error	Commission in 1987 map	Omission in 1987 map	Hypothesized Error (percent of 1987 map)
FG	59	1.32	2.06	107	48	0.00	0.40	13.60
FCSB	824	4.36	2.06	195	629	5.39	0.00	13.60
SA	2079	3.08	2.06	1084	995	10.69	0.00	13.60
Sa	328	0.70	2.06	1249	921	0.00	10.30	13.60
CH	353	1.14	2.06	768	415	0.00	4.42	13.60
CI	36	0.93	2.06	100	64	0.00	0.54	13.60
SN	39	3.41	2.06	17	23	0.19	0.00	13.60
PF	13	0.61	2.06	58	45	0.00	0.37	13.60
PE	6	1.76	2.06	7	1	0.00	0.01	13.60
AG	0	0.00	2.06	153	153	0.00	1.33	13.60

Interval Categories	2002_2017							
	Observed Gross Loss	Intensity of Losses	Uniform change	Uniform Annual Loss	Annual # of pixels positions of hypothesized error	Commission in 2002 map	Omission in 2002 map	Hypothesized Error (percent of 2002 map)
FG	117	2.56	2.51	113	3	0.03	0.00	17.65
FCSB	882	6.10	2.51	49	832	6.92	0.00	17.65
SA	2132	3.83	2.51	955	1177	11.85	0.00	17.65
Sa	1002	1.80	2.51	1640	638	0.00	7.07	17.65
CH	265	0.83	2.51	1119	854	0.00	9.33	17.65
CI	4	0.09	2.51	198	194	0.00	1.67	17.65
SN	146	5.25	2.51	24	123	1.02	0.00	17.65
PF	6	0.47	2.51	50	44	0.00	0.36	17.65
PE	0	0.00	2.51	6	6	0.00	0.05	17.65
AG	0	0.00	2.51	401	401	0.00	3.56	17.65

Time Interval 1987_2002								
transitions TO FG								
FROM Category	Observed transition to FG	Intensity of transition to FG	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition to FG	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map1987	Ommission intensity in map1987	Error as percent of map1987
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SA	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Sa	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00

Time Interval 2002_2017								
transitions TO FG								
FROM Category	Observed transition to FG	Intensity of transition to FG	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition to FG	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Ommission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SA	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Sa	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00

Time Interval		1987_2002						
transitions TO		FCSB						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	FCSB	FCSB	of transitions	FCSB		in map1987	in map1987	of map1987
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SA	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Sa	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Time Interval		2002_2017						
transitions TO		FCSB						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	FCSB	FCSB	of transitions	FCSB	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
S ARBO	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
S ARBU	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00

Time Interval 1987_2002								
transitions TO SA								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	SA	SA	of transitions	SA	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	0	0.00	0.33	15	15	0.00	3.98	2.69
FCSB	372	1.96	0.33	46	326	87.69	0.00	2.69
Sa	0	0.00	0.33	161	161	0.00	30.17	2.69
CH	0	0.00	0.33	107	107	0.00	22.28	2.69
CI	0	0.00	0.33	13	13	0.00	3.46	2.69
SN	0	0.00	0.33	4	4	0.00	1.06	2.69
PF	0	0.00	0.33	7	7	0.00	1.93	2.69
PE	0	0.00	0.33	1	1	0.00	0.29	2.69
AG	0	0.00	0.33	18	18	0.00	4.52	2.69
Time Interval 2002_2017								
transitions TO SA								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	SA	SA	of transitions	SA	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.46	23	23	0.00	3.76	4.59
FCSB	583	4.04	0.46	28	555	95.13	0.00	4.59
SA	0	0.00	0.46	278	278	0.00	32.28	4.59
CH	0	0.00	0.46	158	158	0.00	21.36	4.59
CI	0	0.00	0.46	25	25	0.00	4.09	4.59
SN	0	0.00	0.46	14	14	0.00	2.33	4.59
PF	0	0.00	0.46	7	7	0.00	1.13	4.59
PE	0	0.00	0.46	1	1	0.00	0.12	4.59
AG	0	0.00	0.46	50	50	0.00	7.84	4.59

Time Interval 1987_2002								
transitions TO Sa								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	Sa	Sa	of transitions	Sa	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	0	0.00	0.95	50	50	0.00	3.74	4.44
FCSB	359	1.90	0.95	151	208	16.20	0.00	4.44
SA	927	1.37	0.95	598	329	25.57	0.00	4.44
CH	0	0.00	0.95	346	346	0.00	21.22	4.44
CI	0	0.00	0.95	43	43	0.00	3.26	4.44
SN	0	0.00	0.95	13	13	0.00	0.99	4.44
PF	0	0.00	0.95	24	24	0.00	1.82	4.44
PE	0	0.00	0.95	4	4	0.00	0.27	4.44
AG	0	0.00	0.95	57	57	0.00	4.26	4.44
Time Interval 2002_2017								
transitions TO Sa								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	Sa	Sa	of transitions	Sa	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.79	41	41	0.00	3.96	4.13
FCSB	137	0.94	0.79	112	25	2.49	0.00	4.13
SA	860	1.54	0.79	386	474	47.56	0.00	4.13
CH	0	0.00	0.79	286	286	0.00	22.30	4.13
CI	0	0.00	0.79	45	45	0.00	4.31	4.13
SN	0	0.00	0.79	25	25	0.00	2.45	4.13
PF	1	0.08	0.79	12	11	0.00	1.07	4.13
PE	0	0.00	0.79	1	1	0.00	0.13	4.13
AG	0	0.00	0.79	90	90	0.00	8.25	4.13

Time Interval 1987_2002								
transitions TO		CH						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	CH	CH	of transitions	CH	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	36	0.80	0.95	44	8	0.00	0.54	3.82
FCSB	84	0.44	0.95	195	112	0.00	7.26	3.82
SA	1033	1.53	0.95	576	457	32.06	0.00	3.82
Sa	218	0.46	0.95	482	264	0.00	15.60	3.82
CI	32	0.83	0.95	38	5	0.00	0.36	3.82
SN	15	1.31	0.95	10	5	0.34	0.00	3.82
PF	9	0.41	0.95	22	14	0.00	0.94	3.82
PE	0	0.00	0.95	4	4	0.00	0.25	3.82
AG	0	0.00	0.95	57	57	0.00	3.83	3.82
Time Interval 2002_2017								
transitions TO		CH						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	CH	CH	of transitions	CH	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	12	0.27	1.30	71	59	0.00	2.92	3.57
FCSB	96	0.67	1.30	210	114	0.00	5.53	3.57
SA	1006	1.81	1.30	656	350	17.96	0.00	3.57
Sa	753	1.35	1.30	719	33	1.71	0.00	3.57
CI	0	0.00	1.30	81	81	0.00	3.98	3.57
SN	75	2.71	1.30	27	49	2.50	0.00	3.57
PF	5	0.37	1.30	20	15	0.00	0.78	3.57
PE	0	0.00	1.30	2	2	0.00	0.12	3.57
AG	0	0.00	1.30	161	161	0.00	7.63	3.57

Time Interval 1987_2002								
transitions TO		CI						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	CI	CI	of transitions	CI	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	23	0.51	0.03	1	22	45.95	0.00	0.30
FCSB	0	0.00	0.03	5	5	0.00	9.66	0.30
SA	0	0.00	0.03	18	18	0.00	27.64	0.30
Sa	0	0.00	0.03	12	12	0.00	20.93	0.30
CH	17	0.06	0.03	8	9	19.51	0.00	0.30
SN	1	0.05	0.03	0	0	0.49	0.00	0.30
PF	1	0.04	0.03	1	0	0.50	0.00	0.30
PE	6	1.76	0.03	0	6	11.80	0.00	0.30
AG	0	0.00	0.03	1	1	0.00	2.82	0.30
Time Interval 2002_2017								
transitions TO		CI						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	CI	CI	of transitions	CI	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	105	2.29	0.19	6	99	29.03	0.00	1.10
FCSB	61	0.42	0.19	27	34	10.01	0.00	1.10
SA	64	0.11	0.19	108	45	0.00	11.61	1.10
Sa	74	0.13	0.19	108	34	0.00	9.11	1.10
CH	36	0.11	0.19	62	26	0.00	7.12	1.10
SN	0	0.00	0.19	6	6	0.00	1.60	1.10
PF	0	0.02	0.19	3	2	0.00	0.69	1.10
PE	0	0.00	0.19	0	0	0.00	0.08	1.10
AG	0	0.00	0.19	20	20	0.00	5.49	1.10

Time Interval 1987_2002								
transitions TO		SN						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	SN	SN	of transitions	SN	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	1	0.02	0.09	4	3	0.00	1.97	0.63
FCSB	0	0.00	0.09	17	17	0.00	9.61	0.63
SA	38	0.06	0.09	60	22	0.00	12.09	0.63
Sa	17	0.04	0.09	42	24	0.00	13.26	0.63
CH	102	0.33	0.09	26	76	47.63	0.00	0.63
CI	1	0.02	0.09	3	3	0.00	1.65	0.63
PF	0	0.00	0.09	2	2	0.00	1.19	0.63
PE	0	0.00	0.09	0	0	0.00	0.18	0.63
AG	0	0.00	0.09	5	5	0.00	2.80	0.63
Time Interval 2002_2017								
transitions TO		SN						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	SN	SN	of transitions	SN	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.04	2	2	0.00	2.51	0.15
FCSB	0	0.00	0.04	6	6	0.00	7.52	0.15
SA	17	0.03	0.04	22	6	0.00	7.53	0.15
Sa	31	0.06	0.04	22	9	12.68	0.00	0.15
CH	22	0.07	0.04	13	9	12.33	0.00	0.15
CI	2	0.04	0.04	2	0	0.28	0.00	0.15
PF	0	0.00	0.04	1	1	0.00	0.75	0.15
PE	0	0.00	0.04	0	0	0.00	0.08	0.15
AG	0	0.00	0.04	4	4	0.00	5.31	0.15

Time Interval 1987_2002								
transitions TO PF								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	PF	PF	of transitions	PF	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	2.44	0.00
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	9.54	0.00
SA	0	0.00	0.00	0	0	12.33	0.00	0.00
Sa	0	0.00	0.00	0	0	0.00	20.70	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	32.68	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	2.12	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.64	0.00
E	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.18	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	2.78	0.00
Time Interval 2002_2017								
transitions TO PF								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	PF	PF	of transitions	PF	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.02	1	1	0.00	2.48	0.08
FCSB	0	0.00	0.02	2	2	0.00	7.44	0.08
SA	18	0.03	0.02	9	9	30.98	0.00	0.08
Sa	10	0.02	0.02	9	1	3.47	0.00	0.08
CH	0	0.00	0.02	5	5	0.00	15.03	0.08
CI	1	0.02	0.02	1	0	0.98	0.00	0.08
SN	0	0.00	0.02	0	0	0.00	1.53	0.08
PE	0	0.00	0.02	0	0	0.00	0.08	0.08
AG	0	0.00	0.02	2	2	0.00	5.25	0.08

Time Interval 1987_2002								
transitions TO PE								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	PE	PE	of transitions	PE	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SA	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Sa	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Time Interval 2002_2017								
transitions TO PE								
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	PE	PE	of transitions	PE	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SA	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Sa	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00

Time Interval		1987_2002						
transitions TO		AG						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	AG	AG	of transitions	AG	of hypothesized error	in map1987	in map1987	of map1987
FG	0	0.00	0.25	12	12	0.00	2.58	1.51
FCSB	10	0.05	0.25	49	40	0.00	8.15	1.51
SA	81	0.12	0.25	175	94	0.00	17.36	1.51
Sa	93	0.20	0.25	120	27	0.00	5.69	1.51
CH	234	0.75	0.25	73	161	35.96	0.00	1.51
CI	3	0.07	0.25	10	7	0.00	1.61	1.51
SN	24	2.06	0.25	2	22	4.85	0.00	1.51
PF	4	0.17	0.25	5	2	0.00	0.42	1.51
PE	0	0.00	0.25	1	1	0.00	0.19	1.51
Time Interval		2002_2017						
transitions TO		AG						
FROM	Observed transition to	Intensity of transition to	Uniform distribution	hypothesized annual transition to	Annual # of pixels	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	AG	AG	of transitions	AG	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.34	16	16	0.00	2.73	1.40
FCSB	5	0.03	0.34	52	47	0.00	7.43	1.40
SA	168	0.30	0.34	191	24	0.00	3.86	1.40
Sa	134	0.24	0.34	194	60	0.00	9.27	1.40
CH	207	0.65	0.34	103	104	17.79	0.00	1.40
CI	1	0.02	0.34	18	17	0.00	2.79	1.40
SN	71	2.55	0.34	6	65	11.05	0.00	1.40
PF	0	0.00	0.34	5	5	0.00	0.81	1.40
PE	0	0.00	0.34	1	1	0.00	0.09	1.40

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM FG								
TO	Observed transition from	Intensity of transition from	Uniform distribution	hypothesized annual transition from	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	FG	FG	of transitions	FG	of hypothesized error	in map2002	in map2002	of map2002
FCSB	0	0.00	0.03	2	2	0.00	3.57	0.34
SA	0	0.00	0.03	14	14	0.00	19.16	0.34
Sa	0	0.00	0.03	21	21	0.00	25.69	0.34
CH	36	0.08	0.03	16	20	34.11	0.00	0.34
CI	23	0.56	0.03	1	21	36.11	0.00	0.34
SN	1	0.03	0.03	1	0	0.00	0.31	0.34
PF	0	0.00	0.03	1	1	0.00	1.09	0.34
PE	0	0.00	0.03	0	0	0.00	0.13	0.34
AG	0	0.00	0.03	4	4	0.00	6.27	0.34
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM FG								
TO	Observed transition from	Intensity of transition from	Uniform distribution	hypothesized annual transition from	Annual # of pixels	Commission intensity	Omission intensity	Error as percent
Category	FG	FG	of transitions	FG	of hypothesized error	in map2017	in map2017	of map2017
FCSB	0	0.00	0.07	1	1	0.00	0.69	0.82
SA	0	0.00	0.07	21	21	0.00	15.51	0.82
Sa	0	0.00	0.07	37	37	0.00	23.95	0.82
CH	12	0.02	0.07	38	25	0.00	17.74	0.82
CI	105	1.04	0.07	6	99	84.67	0.00	0.82
SN	0	0.00	0.07	1	1	0.00	0.93	0.82
PF	0	0.00	0.07	1	1	0.00	0.93	0.82
PE	0	0.00	0.07	0	0	0.00	0.08	0.82
AG	0	0.00	0.07	12	12	0.00	9.58	0.82

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM FCSB								
TO Category	Observed transition from FCSB	Intensity of transition from FCSB	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from FCSB	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	0.47	18	18	0.00	2.16	2.18
SA	372	0.89	0.47	184	187	22.72	0.00	2.18
Sa	359	0.59	0.47	283	76	9.25	0.00	2.18
CH	84	0.18	0.47	233	149	0.00	15.33	2.18
CI	0	0.00	0.47	21	21	0.00	2.43	2.18
SN	0	0.00	0.47	15	15	0.00	1.79	2.18
PF	0	0.00	0.47	10	10	0.00	1.18	2.18
PE	0	0.00	0.47	1	1	0.00	0.14	2.18
AG	10	0.08	0.47	59	49	0.00	5.66	2.18
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM FCSB								
TO Category	Observed transition from FCSB	Intensity of transition from FCSB	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from FCSB	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	0.49	15	15	0.00	1.66	3.89
SA	583	1.80	0.49	125	458	51.97	0.00	3.89
Sa	137	0.24	0.49	283	147	0.00	14.27	3.89
CH	96	0.17	0.49	293	197	0.00	18.28	3.89
CI	61	0.61	0.49	48	13	1.44	0.00	3.89
SN	0	0.00	0.49	9	9	0.00	0.99	3.89
PF	0	0.00	0.49	9	9	0.00	0.99	3.89
PE	0	0.00	0.49	1	1	0.00	0.08	3.89
AG	5	0.03	0.49	99	94	0.00	9.62	3.89

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM SA								
TO Category	Observed transition from SA	Intensity of transition from SA	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from SA	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	1.49	69	69	0.00	3.21	3.67
FCSB	0	0.00	1.49	126	126	0.00	5.71	3.67
Sa	927	1.51	1.49	907	19	0.94	0.00	3.67
CH	1033	2.19	1.49	608	425	20.45	0.00	3.67
CI	0	0.00	1.49	78	78	0.00	3.60	3.67
SN	38	1.29	1.49	46	8	0.00	0.37	3.67
PF	0	0.01	1.49	37	37	0.00	1.75	3.67
PE	0	0.00	1.49	4	4	0.00	0.22	3.67
AG	81	0.68	1.49	204	123	0.00	5.58	3.67
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM SA								
TO Category	Observed transition from SA	Intensity of transition from SA	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from SA	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	1.43	51	51	0.00	2.35	2.66
FCSB	0	0.00	1.43	22	22	0.00	1.04	2.66
Sa	860	1.54	1.43	780	80	3.75	0.00	2.66
CH	1006	1.76	1.43	764	242	11.37	0.00	2.66
CI	64	0.64	1.43	165	101	0.00	4.53	2.66
SN	17	0.99	1.43	26	9	0.00	0.43	2.66
PF	18	1.06	1.43	26	8	0.00	0.37	2.66
PE	0	0.00	1.43	3	3	0.00	0.12	2.66
AG	168	0.90	1.43	296	128	0.00	5.65	2.66

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM Sa								
TO Category	Observed transition from Sa	Intensity of transition from Sa	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from Sa	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	0.27	10	10	0.00	3.02	1.37
FCSB	0	0.00	0.27	19	19	0.00	5.38	1.37
SA	0	0.00	0.27	119	119	0.00	26.67	1.37
CH	218	0.46	0.27	125	93	28.37	0.00	1.37
CI	0	0.00	0.27	12	12	0.00	3.39	1.37
SN	17	0.59	0.27	8	10	2.95	0.00	1.37
PF	0	0.00	0.27	6	6	0.00	1.66	1.37
PE	0	0.00	0.27	1	1	0.00	0.20	1.37
AG	93	0.78	0.27	30	63	19.24	0.00	1.37
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM Sa								
TO Category	Observed transition from Sa	Intensity of transition from Sa	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from Sa	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	0.80	25	25	0.00	2.48	2.97
FCSB	0	0.00	0.80	11	11	0.00	1.09	2.97
SA	0	0.00	0.80	294	294	0.00	22.67	2.97
CH	753	1.32	0.80	414	339	33.83	0.00	2.97
CI	74	0.74	0.80	81	6	0.00	0.62	2.97
SN	31	1.88	0.80	11	21	2.06	0.00	2.97
PF	10	0.59	0.80	14	4	0.00	0.39	2.97
PE	0	0.00	0.80	1	1	0.00	0.13	2.97
AG	134	0.71	0.80	151	18	0.00	1.73	2.97

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM CH								
TO Category	Observed transition from CH	Intensity of transition from CH	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from CH	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	0.26	10	10	0.00	2.71	2.61
FCSB	0	0.00	0.26	18	18	0.00	4.84	2.61
SA	0	0.00	0.26	115	115	0.00	24.54	2.61
Sa	0	0.00	0.26	168	168	0.00	32.17	2.61
CI	17	0.43	0.26	10	7	1.97	0.00	2.61
SN	102	3.46	0.26	4	98	27.85	0.00	2.61
PF	0	0.01	0.26	5	5	0.00	1.41	2.61
PE	0	0.00	0.26	1	1	0.00	0.18	2.61
AG	234	1.97	0.26	23	211	59.61	0.00	2.61
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM CH								
TO Category	Observed transition from CH	Intensity of transition from CH	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from CH	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	0.21	6	6	0.00	2.29	1.71
FCSB	0	0.00	0.21	3	3	0.00	1.01	1.71
SA	0	0.00	0.21	71	71	0.00	21.23	1.71
Sa	0	0.00	0.21	122	122	0.00	31.62	1.71
CI	36	0.36	0.21	21	15	5.67	0.00	1.71
SN	22	1.29	0.21	3	19	7.01	0.00	1.71
PF	0	0.00	0.21	4	4	0.00	1.36	1.71
PE	0	0.00	0.21	0	0	0.00	0.12	1.71
AG	207	1.11	0.21	34	173	65.36	0.00	1.71

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM CI								
TO Category	Observed transition from CI	Intensity of transition from CI	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from CI	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	0.02	1	1	0.00	1.99	0.19
FCSB	0	0.00	0.02	1	1	0.00	3.57	0.19
SA	0	0.00	0.02	9	9	0.00	19.17	0.19
Sa	0	0.00	0.02	12	12	0.00	25.70	0.19
CH	32	0.07	0.02	10	23	63.63	0.00	0.19
SN	1	0.03	0.02	1	0	0.55	0.00	0.19
PF	0	0.00	0.02	0	0	0.00	1.09	0.19
PE	0	0.00	0.02	0	0	0.00	0.13	0.19
AG	3	0.02	0.02	2	0	1.09	0.00	0.19
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM CI								
TO Category	Observed transition from CI	Intensity of transition from CI	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from CI	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	1.62	0.03
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.71	0.03
SA	0	0.00	0.00	1	1	0.00	15.93	0.03
Sa	0	0.00	0.00	1	1	0.00	24.53	0.03
CH	0	0.00	0.00	1	1	0.00	24.96	0.03
SN	2	0.13	0.00	0	2	49.82	0.00	0.03
PF	1	0.06	0.00	0	1	23.65	0.00	0.03
PE	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.08	0.03
AG	1	0.01	0.00	0	1	13.69	0.00	0.03

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM SN								
TO Category	Observed transition from SN	Intensity of transition from SN	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from SN	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	0.02	1	1	0.00	1.98	0.21
FCSB	0	0.00	0.02	1	1	0.00	3.55	0.21
SA	0	0.00	0.02	9	9	0.00	19.08	0.21
Sa	0	0.00	0.02	14	14	0.00	25.59	0.21
CH	15	0.03	0.02	10	5	11.97	0.00	0.21
CI	1	0.01	0.02	1	0	0.00	0.91	0.21
PF	0	0.00	0.02	0	0	0.00	1.08	0.21
PE	0	0.00	0.02	0	0	0.00	0.13	0.21
AG	24	0.20	0.02	3	21	53.85	0.00	0.21
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM SN								
TO Category	Observed transition from SN	Intensity of transition from SN	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from SN	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	0.08	2	2	0.00	1.56	0.71
FCSB	0	0.00	0.08	1	1	0.00	0.69	0.71
SA	0	0.00	0.08	27	27	0.00	15.46	0.71
Sa	0	0.00	0.08	46	46	0.00	23.88	0.71
CH	75	0.13	0.08	46	29	20.06	0.00	0.71
CI	0	0.00	0.08	8	8	0.00	5.34	0.71
PF	0	0.00	0.08	1	1	0.00	0.93	0.71
PE	0	0.00	0.08	0	0	0.00	0.08	0.71
AG	71	0.38	0.08	15	56	38.52	0.00	0.71

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM PF								
TO Category	Observed transition from PF	Intensity of transition from PF	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from PF	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	0.01	0	0	0.00	1.97	0.07
FCSB	0	0.00	0.01	0	0	0.00	3.53	0.07
SA	0	0.00	0.01	3	3	0.00	18.96	0.07
Sa	0	0.00	0.01	4	4	0.00	25.44	0.07
CH	9	0.02	0.01	3	5	40.10	0.00	0.07
CI	1	0.02	0.01	0	1	3.87	0.00	0.07
SN	0	0.00	0.01	0	0	0.00	1.62	0.07
PE	0	0.00	0.01	0	0	0.00	0.13	0.07
AG	4	0.03	0.01	1	3	20.98	0.00	0.07
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM PF								
TO Category	Observed transition from PF	Intensity of transition from PF	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from PF	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	1.54	0.02
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.68	0.02
SA	0	0.00	0.00	1	1	0.00	15.30	0.02
Sa	1	0.00	0.00	2	1	0.00	12.39	0.02
CH	5	0.01	0.00	2	3	47.26	0.00	0.02
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	1.34	0.02
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.92	0.02
PE	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.08	0.02
AG	0	0.00	0.00	1	1	0.00	9.44	0.02

Time Interval 1987_2002								
transitions FROM PE								
TO Category	Observed transition from PE	Intensity of transition from PE	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from PE	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2002	Omission intensity in map2002	Error as percent of map2002
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	1.95	0.05
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	3.49	0.05
SA	0	0.00	0.00	1	1	0.00	18.80	0.05
Sa	0	0.00	0.00	2	2	0.00	25.25	0.05
CH	0	0.00	0.00	1	1	0.00	20.65	0.05
CI	6	0.14	0.00	0	5	97.81	0.00	0.05
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	1.60	0.05
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	1.06	0.05
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	6.14	0.05
Time Interval 2002_2017								
transitions FROM PE								
TO Category	Observed transition from PE	Intensity of transition from PE	Uniform distribution of transitions	hypothesized annual transition from PE	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity in map2017	Omission intensity in map2017	Error as percent of map2017
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
FCSB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SA	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
Sa	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
AG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00

Time Interval 1987_2002								
transitions								
FROM AG								
TO	Observed transition from	Intensity of transition from	Uniform distribution	hypothesized annual transition from	Annual # of pixels of hypothesized error	Commission intensity	Ommission intensity	Error as percent
Category	AG	AG	of transitions	AG		in map2002	in map2002	of map2002
FG	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
FC_SB	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
S ARBO	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
S ARBU	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CH	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
CI	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
SN	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PF	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00
PE	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00

Enquête ménage

I. localisation du **ge**

Record your current

Coordonnées géographiques

latitude (x.y °)

longitude (x.y °)

altitude (m)

précision (m)

Figure 71: d

ge

Figure 72: d

ge



Nom et prénom de l'enquêteur

Commune

Village

- BADARA
- BANA
- BANAKELEDAGA
- DAFINSO
- DIARRADOUGOU
- DINDERESSO

- DOUFIGUISSO
- KODARA
- KOUMI
- MOAMY
- LANFIERA
- TIEN
- TOUKORO
- TOUKORO SAMBLA
- YIRWAL

II. Caractéristiques de l'échantillon

Sexe

- Homme
- Femme

Age

Ethnie

- Mossi
- Peulh
- Bobo
- Autre

Profession

- Agriculteur
- Eleveur
- Commerçant
- Autre

Niveau d'instruction

- Primaire
- Secondaire

- Universitaire
- Coranique
- Autre

III. Perception de la variabilité climatique et de la dynamique d'occupation des sols

Avez-vous noté un changement dans les tendances de la température ?

- Augmentation
- Diminution
- Constant

Avez-vous noté un changement dans les tendances de la pluviométrie ?

- Augmentation
- Diminution
- Constant

Avez-vous noté un changement dans les tendances des intensités des pluies ?

- Augmentation
- Diminution
- Constant

Avez-vous noté une fréquence des inondations ces dernières années ?

- Oui
- Non

Avez-vous constaté un décalage de la saison pluvieuse

- Oui
- Non

Avez-vous noté un changement dans la fréquence des poches de sécheresses ?

- Augmentation
- Diminution
- Constant

Quelle est la fréquence des événements pluviométrique extrême

- Augmentation
- Diminution
- Constant

Selon vous, le couvert végétal de votre commune est-il en perpétuel évolution ?

- Oui
- Non
- Ne sait pas

Si oui, dans quel sens a-t-elle évolué ?

- Dégradation
- Amélioration
- Stabilité

Quelles sont les unités d'occupation qui ont augmenté en superficies ces vingt dernières années ?

- Végétation
- Champs
- Sols nus
- Plan d'eau
- Habitat

Quelles sont les unités d'occupation qui ont diminué en superficies ces vingt dernières années ?

- Végétation
- Champs
- Sols nus
- Plan d'eau
- Habitat

IV. Perception paysanne de l'érosion hydrique

Que savez-vous de l'érosion hydrique des sols ?

Quels dégâts occasionnent l'érosion ?

-
- Perte production agricole (pertes de récolte, surcoût d'intrant, baisse de fertilité des sols)
- Envasement du Kou
- Qualité des sols (perte de profondeur de travail, MO ...)
- Autre

A préciser

Quelle est la situation topographique de votre champ ?

- Sommet
- Versant
- 3=Bas-fonds

Quel type de labour pratiquez-vous ?

- Manuel
- Attelé
- Autres

Comment labourez vous votre terrain par rapport à la pente?

- Parallèle
- Perpendiculaire

Utilisez-vous les feux de brousse ?

- Oui
- Non

Que cultivez-vous ?

Constatez-vous de variations de votre production ?

- Hausse
- Baisse
- Stagnation

Observez-vous une perte de terre dans vos champs ?

- Oui
- Non

Pourquoi?

Peut-on observer ces pertes de terre à une période spécifique de l'année ?

- Début de saison pluvieuse
- Fin de saison pluvieuse

Quelle est l'ampleur de ces pertes de terre?

- Forte
- Moyenne
- Faible

De quelles natures sont les éléments transportés ?

- Boue
- Sable
- Gravier
- Autres

Quelle est la destination de ces pertes de terre issus de l'érosion dans vos champs ?

Avez-vous été contactés pour discuter de ce problème de perte en terre ?

- Oui
- Non

Si oui, quand?

Qui vous a contacté?

V. Stratégie d'adaptation

Y a-t-il des projets, programmes, ONG, etc. intervenant ou sensibilisant sur les techniques de conservation des eaux et des sols dans votre zone ?

- Oui
- Non
- Autre

Quels sont les projets ou programmes que vous connaissez

Que font ces projets concrètement pour vous accompagner dans la zone ?

Que fait l'État pour vous soutenir à lutter contre l'érosion hydrique des sols ?

Que pensez-vous des actions posées et proposées par l'État pour vous soutenir face au phénomène d'érosion de vos terres ?

Pensez-vous que ces actions peuvent être améliorées ?

Si oui, comment pourront-ils le faire ?

Quelles sont les recommandations pour améliorer l'efficacité des actions ?

Vos champs disposent-ils des ouvrages antiérosifs ?

- Oui
- Non

Comment et quand les avez-vous réalisés

Quelles sont les mesures prises pour éviter l'érosion ?

Menez-vous des opérations pour freiner la perte de terre ?

- Bandes enherbées
- Cordons pierreux
- Reboisement
- Traitement des ravines
- Recul des exploitants maraîchères
- Autres

Auriez-vous la capacité de le faire par vous-mêmes ?

- Oui
- Non

Guide d'entretiens

1. Présentation
2. Comment percevez-vous l'évolution du climat ces 30 dernières années (températures et pluviométrie ?)
3. Quels sont les causes et les conséquences de cette évolution ?
4. Comment percevez-vous l'évolution de la végétation ces 30 dernières années dans le bassin versant du Kou ?
5. Quels sont les causes et les conséquences de l'évolution de la végétation ?
6. Connaissance de l'érosion hydrique des sols.
7. Quelle est votre appréciation du niveau de l'érosion des sols dans le bassin versant du Kou ?
8. quelle conséquence l'érosion hydrique entraine dans le bassin versant du Kou ?
9. Quelles actions menées vous localement pour venir à bout de ce phénomène ?
10. Difficultés majeures dans la réalisation de ces actions ?

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	: Variables et indicateurs de l'étude.....	30
Tableau 2	: Caractéristique des images Landsat.....	40
Tableau 3	: Indices des extrêmes pluviométriques.....	44
Tableau 4	: Matrice de confusion de l'image Landsat 5 TM de 1987 (pixel).....	56
Tableau 5	: matrice de confusion de l'image Landsat 7 ETM+ de 2002 (pixel).....	57
Tableau 6	: Matrice de confusion de l'image Landsat 8 OLI – TIRS de 2017 (pixel)..	60
Tableau 7	: Classification de l'érosion en fonction en fonction de l'érodibilité.....	65
Tableau 8	: Population de quelques villages riverains dans le bassin versant du Kou et de la ville de Bobo-Dioulasso et leur projection jusqu'en 2013.....	90
Tableau 9	: Coefficient d'occupation du sol C en fonction du type d'occupation.....	105
Tableau 10	: tendances des indices de précipitations extrêmes à la station synoptique de Bobo Dioulasso.....	112
Tableau 11	: Résultats des tests statistiques appliqués aux pluies maximales.....	120
Tableau 12	: Périodes de retour des pluies maximales estimées dans le bassin versant du Kou.....	122
Tableau 13	: superficie et taux moyen d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols (1987 -2002).....	126
Tableau 14	: Matrice de transition des unités d'occupation des sols (1987 et 2002).....	129
Tableau 15	: taux de conversion des unités d'occupations entre 1987 et 2002.....	130
Tableau 16	: superficies et taux moyens annuels d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols (2002 – 2017).....	
Tableau 17	: Matrice de transition des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017..	133
Tableau 18	: taux de conversion des unités d'occupations entre 2002 et 2017.....	134
Tableau 19	: Comparaison de l'efficacité des techniques de récupération des terres dégradées	

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Principales étapes de l'analyse fréquentielle.....	50
Figure 2	: Composition colorée 4-3-2 de l'image Landsat 5 TM de 1987.....	52
Figure 3	: Composition colorée 4-3-2 de l'image Landsat 7 ETM+ de 2002.....	52
Figure 4	: Composition colorée 5-4-3 de l'image Landsat 8 OLI-TIRS 2017.....	52
Figure 5	: Diagramme pluviothermique de 1998 à 2018 de la station synoptique de : Bobo-Dioulasso.....	71
Figure 6	: Variabilité interannuelle de la pluviométrie à la station de Bobo-Dioulasso.	72
Figure 7	: Rupture de stationnarité par le test de Pettitt dans les séries pluviométriques du bassin versant.....	73
Figure 8	: Rupture de stationnarité par le test Buishand dans les séries pluviométriques du bassin versant.....	74
Figure 9	: variabilité interannuelle de température dans le bassin versant du Kou (1950 – 2018).....	75
Figure 10	: Coupe hydrogéologique et géologique de la zone de Bobo Dioulasso.....	76
Figure 11	: Profil topographique du Sud au Nord du bassin versant du Kou.....	87
Figure 12	: Evolution des superficies emblavées et des productions de riz entre 2000 et 2013 dans la province du Houet.....	93
Figure 13	: Evolution des superficies emblavées et des productions de maïs entre 2000 et 2013 dans la province de Houet.....	94
Figure 14	: Evolution des superficies emblavées et des productions de sorgho entre 2000 et 2013.....	95
Figure 15	: Indice des totaux annuels des précipitations (PRCPTOT) (1958-1987).....	113
Figure 16	: Indice des totaux des précipitations (PRCPTOT) (1988-2017).....	113
Figure 17	: Indices des jours consécutivement humides (CWD) (1958-1987).....	115
Figure 18	: Indices des jours consécutivement humides (CWD) (1988-2017).....	115
Figure 19	: Indice des jours consécutivement secs (CDD) (1958-1987).....	115
Figure 20	: Indice des jours consécutivement sec (CDD) (1988-2017).....	115
Figure 21	: Indice de maximum d'une journée de pluie (R1day) (1858-1987).....	117
Figure 22	: Indice de maximum d'une journée de pluie (R1day) (1988-2017).....	117

Figure 23	: Cumul maximum des précipitations de 5jours (RX5day) (1958-1987).....	117
Figure 24	: Cumul maximum des précipitations de 5jours (RX5day) (1988-2017).....	117
Figure 25	: Indice de jour très humide (R95p) (1958-1987).....	119
Figure 26	: Indice de jour très humide (R95p) (1988-2017).....	119
Figure 27	: Indice de jour très humide (R95p) (1988-2017).....	119
Figure 28	: Indice de jour extrêmement humide (R99p) (1988-2017).....	119
Figure 29	: Ajustement de la loi GEV sur la station synoptique de Bobo Dioulasso.....	121
Figure 30	: Ajustement de la loi GEV sur la station de Farakoba.....	121
Figure 31	: Ajustement de la loi GEV sur la station de Nasso.....	121
Figure 32	: Ajustement de la loi GEV sur la station de la vallée du Kou.....	121
Figure 33	: Intensité des changements opérés par catégorie d'occupation des sols entre 1987 et 2002.....	136
Figure 34	: Intensité des changements opérés par catégorie d'occupation des sols entre 2002 et 2017.....	137
Figure 35	: Intensités et vitesses de changement par catégorie d'occupation des sols entre 1987 et 2002.....	138
Figure 36	: Intensités et vitesses de changement par catégorie d'occupation des sols entre 2002 et 2017.....	139
Figure 37	: Composantes du bilan hydrologique modélisé par SWAT	148
Figure 38	: Transport des éléments (eau, sédiments, pesticides, nutriments, ...) au sein du réseau hydrographique.....	150
Figure 39	: Evolution des débits simulés et observés avec le modèle SWAT	152
Figure 40	Perception paysanne de la tendance des pluies	156
Figure 41	Perception paysanne de l'évolution du couvert végétal	156
Figure 42	Perception paysanne de la tendance de l'évolution du couvert végétal	156
Figure 43	Perception paysanne de l'évolution des unités d'occupation	157
Figure 44	Observation des pertes de terre dans les champs	160
Figure 45	Ampleur des pertes de terre dans les champs	160
Figure 46	Perception de l'impact de l'érosion par les paysans	161
Figure 47	Présence de dispositif antiérosif dans les champs	163
Figure 48	dispositif antiérosif et techniques de récupération des terres dégradées	163

LISTE DES PHOTOS

Photo 1	: A 100 m en amont du pont de Nasso, le lit de la rivière Kou est ensablé	144
Photo 2	: Mare artificielle créée par l'épandage des du Kou	145
Photo 3	: Ensablement de la rivière Kou	159
Photo 4	: Surface érodée dans le bassin versant du Kou	159
Photo 5	: Diguette en pierre en état de dégradation	164
Photo 6	: Sac remplie de terre en état de dégradation	164

LISTE DES CARTES

Carte 1	: Distribution spatiale des villages d'enquête dans le bassin versant du kou	35
Carte 2	: Réseau d'observation hydrométéorologique au tour du bassin versant du Kou	38
Carte 3	: Polygone de thiessen	42
Carte 4	: Localisation de la zone d'étude	66
Carte 5	: Domaines climatiques du Burkina Faso	70
Carte 6	: Formations géologiques du bassin versant du Kou	79
Carte 7	: Unité géomorphologique du bassin versant du Kou	82
Carte 8	: Formations pédologiques du bassin versant du Kou	84
Carte 9	: Modèle Numérique de Terrain et réseau hydrographique du bassin versant du Kou	88
Carte 10	: Distribution du facteur topographique LS dans le bassin versant du Kou	102
Carte 11	: Distribution de l'indice de l'érodibilité des sols (K)	104
Carte 12	: Distribution spatiale du facteur C dans le bassin versant du Kou	107
Carte 13	: Distribution de l'indice d'érosivité de la pluie (R)	108
Carte 14	: Vulnérabilité des sols à l'érosion du bassin versant du Kou	109
Carte 15	: Occupation des sols du bassin versant du Kou en 1987	123
Carte 16	: Occupation des sols du bassin versant du Kou en 2002	124
Carte 17	: Occupation des sols du bassin versant du Kou en 2017	125
Carte 18	: Dynamique d'occupation des sols entre 1987 et 2002	128
Carte 19	: Dynamique d'occupation des sols entre 2002 et 2017	130

Carte 20	Climat de référence (2010-2015) – Lu 2017	153
Carte 21	Climat de référence (2010-2015) – Lu 2030	153
Carte 22	Climat RCP 4.5 (2025-2030) – Lu 2017	153
Carte 23	Climat RCP 8.5 (2025-2030) – Lu 2017	153
Carte 24	Climat RCP 4.5 (2025-2030) – Lu 2030	153
Carte 25	Climat RCP 8.5 (2025-2030) – Lu 2030	153

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	2
DEDICACE.....	4
REMERCIEMENT	5
SIGLES ET ABREVIATIONS	8
RESUME	10
ABSTRACT	11
INTRODUCTION GENERALE	12
PREMIERE PARTIE :	14
CADRE THEORIQUE, METHODOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE.....	14
CHAPITRE 1 :	15
CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE.....	15
1.1. Cadre théorique.....	15
1.1.1. Etat des connaissances.....	15
1.1.2. Clarification des concepts.....	21
1.1.3. Problématique	25
1.1.4. Hypothèses de recherche.....	28
1.1.5. Objectifs de recherche	29
1.1.6. Variables de recherche	29
1.1.7. Recherche documentaire	32
1.2. Données et méthode de recherche.....	32
1.2.1. Méthodes d’approches.....	32
1.2.2. Choix du bassin versant du kou	33
1.2.3. Outils de collecte et de traitement des données	34
1.2.4. Observation directe et travaux sur le terrain	35
1.2.4.1. Echantillonnage	35
1.2.4.1.1. Echantillonnage spatial	35
1.2.4.1.2. Echantillonnage démographique	37
1.2.4.2. Observation directe sur le terrain	37
1.2.4.3. Outils de collecte et de traitement des données	Erreur ! Signet non défini.
1.2.4.4. Natures et sources des données utilisées	38
1.2.4.4.1. Réseau d’observation hydrométéorologique	38
1.2.4.4.2. Données climatologiques	40
1.2.4.4.3. Données hydrométriques	40
1.2.4.4.4. Données d’analyse spatiale	40
1.2.4.5. Estimation des champs de pluie	41

1.2.4.6.	Calculs des indices d'extrême pluviométrique.....	44
1.2.4.7.	Analyse fréquentielle.....	45
1.2.4.8.	Evaluation de la dynamique d'occupation des sols dans le bassin versant du Kou	51
1.2.4.8.1.	Le protocole de traitement des images satellites Landsat	51
1.2.4.8.2.	Calcul des taux moyens annuels d'expansion spatiale (T)	61
1.2.4.8.3.	Détection des changements des unités d'occupation du sol	61
1.2.4.8.4.	Analyse de l'intensité des changements	62
1.2.4.8.5.	Projection de la dynamique d'occupation des sols à l'horizon 2035	63
1.2.4.9.	Approche cartographique de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique	63
1.2.4.9.1.	Cartographie du facteur érosivité de la pluie.....	63
1.2.4.9.2.	Cartographie du facteur érodibilité des sols	64
1.2.4.9.3.	Cartographie du facteur occupation des sols (C).....	66
CHAPITRE 2 :	.....	70
CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE.....	.....	70
2.1. Caractéristiques physiques de la zone d'étude.....	.....	70
2.1.1. Situation géographique du bassin versant du Kou.....	.....	70
2.1.2. Caractéristiques climatiques.....	.....	72
2.1.2.1. Variations interannuelles des précipitations dans le bassin versant du Kou.....	.....	74
2.1.2.2. Analyse de rupture de stationnarité dans le bassin versant du Kou.....	.....	76
2.1.2.3. Variations interannuelles des températures dans le bassin versant du Kou.....	.....	77
2.1.3. Caractéristiques géologiques.....	.....	78
2.1.3.1. Les Grès de Kawara-Sindou (GKS) .....	.....	79
2.1.3.2. Les Grès fins glauconieux (Gfg) .....	.....	80
2.1.3.3. Les Grès à granules de quartz (Ggq).....	.....	80
2.1.3.4. Les Siltstones, Argilites et Carbonates (SAC1) .....	.....	80
2.1.3.5. Les Grès fins roses (Gfr).....	.....	81
2.1.4. Caractéristiques géomorphologiques.....	.....	82
2.1.4.1. Reliefs résiduels.....	.....	83
2.1.4.2. Glacis actuel.....	.....	84
2.1.4.3. Ensembles fluvio-alluviaux .....	.....	84
2.1.5. Caractéristiques pédologiques, états et risques de dégradation.....	.....	86
2.1.5.1. Type de sol.....	.....	86
2.1.5.2. Etats et risques de dégradation des ressources en sol .....	.....	88
2.1.5.2.1. Profondeur du sol .....	.....	88
2.1.5.2.2. Texture.....	.....	88
2.1.6. Relief et réseau hydrographique .....	.....	89

2.1.6.1. Relief.....	89
2.1.6.2. Réseau hydrographique	90
2.1.7. Formations végétales	92
2.2. Caractéristiques socio-économique du bassin versant du kou	92
2.2.1. Caractéristiques démographiques du bassin versant du Kou	92
2.2.2. Evolution de la population du bassin versant du Kou	93
2.2.3. Aspects économiques dans le bassin versant du Kou	94
2.2.3.1. Agriculture	95
2.2.3.2. Elevage.....	98
2.2.3.2. Industrie.....	99
Conclusion partielle	99
DEUXIEME PARTIE :	100
MANIFESTATION ET FACTEURS DE L'EROSION DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU.	100
CHAPITRE 3 :	101
CARACTERISATION SPATIALE DES FORMES D'EROSION HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU KOU ...	101
3.1 Les formes d'érosion hydrique	101
3.1.1. Erosion en nappe	101
3.1.2. Erosion en rigole	101
3.1.3. Ravinement.....	102
3.2. Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle aux risques d'érosion	103
3.2.1. Facteur topographique (LS)	103
3.2.2. Erodibilité des sols (K)	105
3.2.3. Facteur d'occupation des sols (C).....	107
3.2.4. Erosivité de la pluie (R).....	110
3.2.5. Vulnérabilité multifactoriel à l'érosion.....	112
CHAPITRE 4:	115
FACTEURS DE L'EROSION HYDRIQUE DES SOLS DU BASSIN VERSANT DU KOU	115
4.1. Evolution des extrêmes pluviométriques dans le bassin versant du Kou	115
4.1.1. Indice des totaux annuels des précipitations (PRCPTOT).....	116
4.1.2. Indices des jours consécutivement humides (CWD) et des jours consécutivement secs (CDD).....	117
4.1.3. Indices de maximum d'une journée de pluies (R1day) et du cumul maximal des précipitations de 5 jours (RX5day).....	119
4.1.4. Indices de Jours très humides (R95p) et de jours extrêmement humides (R99p)	121
4.2. Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières bassins versant du Kou.....	123
4.2.1. Vérification des hypothèses de base dans les hauteurs de pluie maximales.....	123

4.2.2. Ajustement aux lois des séries pluviométriques maximales.....	124
4.3. Dynamique d'occupation des sols dans le processus érosif du bassin versant du kou	126
4.3.1. Etats de l'occupation des sols en 1987, 2002 et 2017.....	126
4.3.1.1. Occupation des sols en 1987	126
4.3.1.2. Occupation des sols en 2002	127
4.3.1.3. Occupation des sols en 2017	128
4.3.2. Changement des unités d'occupation des sols.....	129
4.3.2.1. Changement entre 1987 et 2002	129
4.3.2.1.1. Superficies et taux moyen d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols	129
5.3.2.1.2. Matrice de transition des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002.....	132
4.3.2.1.3. Conversion des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002	133
4.3.2.2. Changement entre 2002 et 2017	134
5.3.2.2.1. Superficies et taux moyen d'expansion spatiale des unités d'occupation des sols	134
4.3.2.2.2. Matrice de transition des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017.....	136
4.3.2.2.3. Conversion des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017	137
4.3.2.2.4. Intensités des changements par intervalle de temps, unités d'occupation des terres et transition des unités d'occupation des sols (1987-2002 et 2002-1987)	138
4.3.2.2.4.1. Intensité de changements par unité d'occupation des sols entre 1987 et 2002	138
4.3.2.2.4.2. Intensité des changements par catégorie d'occupation des sols entre 2002 et 2017	140
4.3.2.2.4.3. Intensités et vitesses des changements des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2002	141
4.3.2.2.4.3. Intensités et vitesses des changements des unités d'occupation des sols entre 2002 et 2017	142
Conclusion partielle	143
TROISIEME PARTIE :	145
EFFETS INDUITS DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU ET STRATEGIE PAYSANNE DE LUTTE.	145
CHAPITRE 5 :	146
EFFET INDUITS DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU.....	146
5.1. Impact de l'érosion sur le milieu physique.....	146
5.1.1. Les dégâts en zones érodées	148
5.1.1.1. Dégradation du bilan hydrique.....	148
5.1.1.2. Appauvrissement du sol	148
5.1.2. Dégâts en zones dépôts.....	149

5.3. Impacts de l'érosion sur le milieu social et économique	149
5.3.1. Difficultés de circulation.....	149
5.3.2. Contraintes matérielles et financières	149
5.4. Simulation de la production de sédiment dans le bassin versant du kou avec le modèle SWAT	150
5.4.1. Calage et validation	153
5.4.2. Production de sédiment dans le bassin versant du kou à l'horizon 2030	155
CHAPITRE 6 :	158
PERCEPTION PAYSANNE ET STRATEGIE DE LUTTE ANTI EROSIVE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU	158
6.1. Perception paysanne de la variabilité climatique et de la dynamique d'occupation des sols.....	158
6.1.1. Perception paysanne de l'évolution des paramètres climatiques	158
6.1.2. Perception paysanne de la dynamique d'occupation des sols.....	159
6.1.3. Perception paysanne de l'érosion hydrique des sols	160
6.2. Stratégie endogène de lutte antiérosive	164
6.2.1. Stratégie juridique, institutionnelle et organisationnelle	164
6.2.2. Pratique résiliente endogène de lutte antiérosive dans le bassin versant du Kou	165
6.2.2.1. Cordons pierreux	166
6.2.2.2. Jachère naturelle	168
6.2.2.3. Le paillage	168
6.2.2.4. Bande enherbé	169
6.2.2.5. Zaï	169
6.2.2.6. Zaï forestier	170
6.2.2.7. Buttage et billonnage	170
6.2.2.8. Autres pratiques paysannes de gestion des terres	171
6.3. Limites des stratégies endogènes de gestion des terres.....	171
6.4. Impact des dispositifs CES pour la réhabilitation d'écosystème dégradé.....	172
6.4. Recommandations.....	173
Conclusion partielle	175
CONCLUSION GENERALE	176
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	180
ANNEXES.....	197
LISTE DES TABLEAUX	234
LISTE DES FIGURES.....	235
LISTE DES CARTES	237
TABLE DES MATIERES	239

