

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



Unité de Formation et de Recherche des Sciences et Technologies

Ecole Doctorale Sciences, Technologies et Ingénierie

Département de Géographie

Laboratoire de Géomatique et d'Environnement

Thèse de doctorat unique

Spécialité : Géographie et Environnement

Option : Hydrologie



Fonctionnement hydrologique et mutations environnementales et socio-économiques dans les bassins versants des marigots de Djibonker et d'Agnak (Basse-Casamance, Sénégal)

Présentée par :

Bouly SANE

Soutenue le **mercredi 29 novembre 2023** devant le jury composé de :

Président : M. SY Oumar, Professeur Titulaire, Université Assane Seck de Ziguinchor

Rapporteurs : M. VISSIN Expédit Wilfrid, Professeur Titulaire, Université Abomey-Calavi

M. FALL Aïdara Chérif Amadou Lamine, Maître de Conférences CAMES, Université Assane Seck de Ziguinchor

M. NDIONE Jacques André, HDR, Agence Régionale pour l'Agriculture et l'Alimentation, Lomé, Togo

Examineur : M. FAYE Cheikh, Maître de Conférences CAMES, Université Assane Seck de Ziguinchor

Directeur de Thèse : M. Tidiane SANE, Maître de Conférences CAMES (Université Assane Seck de Ziguinchor).

Année académique 2022-2023

SOMMAIRE

DEDICACE.....	2
REMERCIEMENTS	3
SIGLES ET ABREVIATIONS	5
RÉSUMÉ.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCTION.....	10
PREMIÈRE PARTIE	18
CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET SOCIO-ÉCONOMIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE	18
CHAPITRE I : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES SOCIO-ÉCONOMIQUES DES BASSINS VERSANTS ÉTUDIÉS.....	19
CHAPITRE II : MORPHOMÉTRIE, HYDRO-GÉOLOGIE, MORPHO-PÉDOLOGIE ET FORMATIONS VÉGÉTALES DES BASSINS D'ÉTUDE.....	61
CHAPITRE III : CARACTÉRISATION DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET DES VARIABLES HYDROLOGIQUES	107
Conclusion de la première partie.....	134
DEUXIÈME PARTIE	135
VULNÉRABILITE DES RESSOURCES EN EAU ET ÉVALUATION DES MATÉRIAUX SÉDIMENTAIRES DES MARIGOTS DE DJIBONKER ET D'AGNAK.....	135
CHAPITRE IV : RESSOURCES EN EAU ET ÉVALUATION DU POTENTIEL D'EAU	137
CHAPITRE V : LE MODELE HEC-HMS : UNE CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL D'EAU RUISSELE DANS LES BASSINS VERSANTS	177
CHAPITRES VI : EVALUATION DES FLUX SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DES MARIGOTS : QUANTIFICATION, DISTRIBUTION ET REPRESENTATION.....	192
TROISIÈME PARTIE	209
DYNAMIQUE DES ÉTATS DE SURFACE DU SOL ET CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE RUISSELLEMENT ET D'ÉROSION	209
CHAPITRE VII : LA RECOMPOSITION DES TERRITOIRES, UNE CONSÉQUENCE DE LA DYNAMIQUE DES UNITÉS PAYSAGÈRES.....	210
CHAPITRES VIII : LES PERTES DES TERRES LIEES AUX MODES D'OCCUPATION DU SOL.....	231
CHAPITRE IX : MUTATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES, ENVIRONNEMENTALES ET DÉVELOPPEMENT DES ACTIVITÉS DANS LES TERRITOIRES DES BASSINS	252
Conclusion de la troisième partie	272
Conclusion générale	273
Références bibliographiques	278
ANNEXES	302

DEDICACE

A :

Mon Papa Malamine SANE ;

Ma maman Aminata BADIANE ;

Mon grand- père maternel, Aliou Badara Sadia BADIANE ;

Ma grand- mère paternel, Adama BADIANE ;

Ma tante, mon amie et confidente Tida GOUDIABY, paix à son âme ;

Nabi MANE, Agnak-Petit, arraché subitement en pleine rédaction de notre thèse ;

Ma famille professionnelle, DECLIC ;

Mes frères et sœurs biologiques ;

A toute ma famille.

Ce travail est le fruit de votre affection, solidarité et entraide.

Il vous est entièrement dédié.

REMERCIEMENTS

Nous remercions, le Professeur Tidiane SANE, notre Directeur de Thèse. Le Professeur SANE fut le premier enseignant avec qui on a été en contact dès notre arrivée à l'UASZ. Ce fut un jour du 21 novembre 2011 alors il déroulait le cours d'analyse documentaire. Il a été aussi notre président de jury de mémoire de Master et a accepté de suite de suivre ce travail de thèse, malgré ses nombreuses obligations pédagogiques et administratives. Il nous a montré la voix de la recherche, en mettant l'accent sur la rigueur et le sérieux dans la démarche scientifique, soyez-en remercier cher Professeur. Nos remerciements vont à l'endroit de mon mentor dans le domaine, je veux nommer le Professeur Cheikh FAYE. Nous nous rappelons comme si s'est hier quand il a accepté de nous accompagner dans ce domaine si complexe, qui est l'hydrologie. Professeur, veuillez recevoir par ses écrits les signes de reconnaissance envers votre personne.

Merci au Pr. Oumar SY, pour avoir accepté de présider ce jury de thèse. Professeur, vous faites partie également des enseignants qui ont motivé notre choix de continuer la recherche pour plusieurs raisons dont je me tairais d'évoquer ici.

Nous remercions les rapporteurs de cette thèse : Pr. VISSIN Expédit Wilfrid pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail. Au Pr. Aïdara Chérif Amadou Lamine Fall, pour les remarques importantes apportées dans le but de donner plus de qualité scientifique à cette présente thèse. Merci au Pr. NDIONE Jacques André, pour les pertinentes remarques apportées à ce travail.

A Madame Manuela GRIPPA du Laboratoire Géoscience de Toulouse, qui a facilité l'obtention des filtres et l'analyse granulométrique des MES.

Nos remerciements vont également à l'endroit des enseignants du Département de Géographie. Je veux nommer : Dr. Oumar SALL, Pr. Oumar SY, Pr. Ibrahima MBAYE, Pr. Tidiane SANE, Pr. Cheikh FAYE, Pr. Aïdara Lamine FALL, Dr. EL Hadji Balla DIEYE, Dr. Alvares F. G. BENGA, Dr. Abdourahmane Mbade SENE, Dr. Demba GAYE, Dr. BALDE, Dr. Cheikh Ahmed Tidiane WADE. Mes chers enseignants, soyez en rassuré que nous avons acquis du savoir-faire durant tout notre parcours dans ce département.

Nous formulons des remerciements à l'endroit de l'équipe de chercheurs et universitaires qui nous a accompagné pendant nos travaux de terrain. Je veux nommer : Yancouba SANE,

Aïssatou CISSE, Aliane BASSENE, Youssouph MBALLO, Jacob BACOURINE, Louis Danda Boy MENDY, Sadio SEYDI, Sadio NIAMANA. Au Dr. Boubacar SOLLY, pour l'appui à la prise en main des logiciels de traitement et de collecte de données géospatiales.

Mes remerciements vont à l'endroit des familles Niamana de Camaracounda et Badji de Yabone qui nous ont accueillies durant notre séjour de terrain. Pendant nos enquêtes de terrain, les populations des villages enquêtés ont été très accueillantes et disponibles dans le partage d'informations sur leurs terroirs respectifs. Nous les remercions également, particulièrement les chefs de villages et leaders communautaires pour l'accueil chaleureux qui nous a été réservé durant notre séjour sur le terrain.

Aux responsables des services techniques, le DRDR et la Délégation régionale de l'INP de Ziguinchor, qui nous a donné libre accès à leurs archives documentaires.

Merci au Président de DECLIC, Salif KANOUTE pour le soutien, les conseils et orientations faites à notre endroit pendant notre parcours doctoral.

Nous remercions nos collègues doctorants du Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE), particulièrement Abdou Kadri SAMBOU, Boubacar BARRY, Henri Marcel SECK, Roger COLY et Marie-Hélène Téning FAYE, pour le soutien moral et la collaboration franche et sincère durant tout le temps passé dans le laboratoire.

Nous disons merci aux docteurs du département de Géographie, je veux nommer Dr. Boubacar SOLLY ; Dr Boubacar Demba BA ; Dr. Mamadou THIOR ; Dr. Issa MBALLO ; Dr. Alexandre BADIANE ; Dr. Victor MENDY ; Dr. Djiby SOW ; Dr. Joseph Samba GOMIS. Nous disons merci à mes amis et frères Mame Cheikh Ibrahima Ndaw, Gabriel Norbert BASSENE, Malang DIEME, César GOMIS pour le soutien moral infaillible.

Merci à mes sœurs du département, nous pouvons citer Fatoumata Binetou SANE, Fatoumata SECK, Fatima DIOP, Khady DIOUF, Oulèye TOURE.

Merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont accompagné et soutenu pendant la réalisation de ce travail scientifique.

Merci à tous.

SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AGRYMET : Centre Régional d'Agro-Hydro-Météorologie

AHP : Analytic Hierarchy Process

AJAC LUKAL : Association des Jeunes Agriculteurs de la Casamance

ANACIM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

ASTER : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CICR : Comité International de la Croix Rouge

CSE : Centre de Suivi Ecologique

DAPSA : Direction de l'Analyse, de la Prévision et des Statistiques Agricoles

DGPRES : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau

ECOWAP : Politique Agricole des Etats de la Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

FAO : Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture

FIGUSED-S : Flow, Intensity Precipitation, Land Use, Slope, Elevation, Line Density

GDEM : Global Digital Elevation Model

GET : Géoscience Environnement Toulouse

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

GPS : Global Positioning System

GRACE : Gravity Recovery and Climate Experiment

HEC-HMS : Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

IFM : Indice de Fournier Modifié

INP : Institut National de Pédologie

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

ISET : Indice de Stockage d'Eau Terrestre

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

LCPM : Laboratoire de Chimie et Physique des Matériaux

LGE : Laboratoire de Géomatique et d'Environnement

LYNS : Laty, Yabone, Niadiou et Samick

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MES : Matières en Suspension

MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NSA : National Security Agency

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

OIM : Organisation Internationale pour les Migrations

OLAC : Office des Lacs

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PADERCA : Projet d'Appui au Développement Rural en Casamance

PIB : Produit Intérieur Brut

PIDAC : Projet Intégré de Développement Agricole de la Casamance

PNA : Plan National d'Adaptation

PPDC : Programme Pôle de Développement de la Casamance

RGPHAE : Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage

RIOB : Réseau Internationale des Organismes des Bassins

RSE : Ressource En Eau

SET : Stockage d'Eau Terrestre

SIG : Système d'Information Géographique

SPEI : Indice Standardisé de Précipitation et d'Evapotranspiration

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

SPI : Indice Standardisé de Précipitation

SWOT : STrengths, Weaknesses, Opportunities et Threats (Force, Faiblesse, Opportunité et Menace)

UASZ : Université Assane Seck de Ziguinchor

USAID : United States Agency for International Development

USLE : Universal Soil Loss Equation

WMS : Watershed Modeling System

RÉSUMÉ

Le fonctionnement hydrologique des bassins-versants ruraux est très complexe en raison des dynamiques climatiques très contrastées et de leurs impacts. Dans le bassin de la Casamance, particulièrement dans les sous-bassins versants de Djibonker et Agnak, ceux-ci ont considérablement modifié leurs comportements hydrologiques. Elles ont favorisé une modification du ruissellement et des mutations environnementales autour desdits marigots. Depuis, les populations, en particulier les exploitants agricoles, tentent d'apporter des réponses en développant des activités agricoles résilientes à la variabilité hydro-climatique et aux changements intervenus dans les bassins-versants. L'objectif général de cette étude est de comprendre le fonctionnement hydrologique et les apports sédimentaires des marigots de Djibonker et d'Agnak face aux mutations environnementales et socio-économiques des territoires adjacents. Une approche méthodologique diversifiée a été adoptée en s'appuyant sur de multiples données géospatiales et socioéconomiques et des outils de l'analyse spatiale. Une campagne de suivi de la concentration des sédiments dans les marigots a été menée sur une période de douze (12) mois. Les enquêtes socio-économiques ont été effectuées auprès de 321 ménages soit au total 25 % des ménages répartis dans 13 villages et complétés par des guides d'entretiens. Elles ont aidé à compléter les analyses cartographiques faites dans ce travail, avec l'utilisation des outils de traitement Arcgis, HEC-HMS, Hydraccess et Excel. Les résultats obtenus indiquent que la zone est marquée par une irrégularité des précipitations et une variation de stockage d'eau en rapport avec les débits déterminés par le modèle HEC-HMS qui passe $120,3\text{m}^3/\text{s}$ en 2004 à $388,4\text{m}^3$ en 2020 à Agnak et de $48,6\text{m}^3/\text{s}$ à $231,9\text{m}^3/\text{s}$ à Djibonker. Cette évolution du ruissellement est en phase avec les dynamiques de l'occupation des sols dans les bassins étudiés. Les analyses statistiques montrent que la concentration des matières en suspension en saison humide et en saison sèche est significativement différente. Face à cette situation, les communautés locales ont mis en œuvre des méthodes de lutte antiérosive et de conservation des eaux et des sols pour mieux développer leurs activités agricoles, en particulier en saison sèche.

Mots clés : Fonctionnement hydrologique, Erosion, Matières en suspension, Mutations socio-environnementales, Bassins-versants, Basse-Casamance

ABSTRACT

The hydrological functioning of rural watersheds is very complex due to the very contrasting climatic dynamics and their impacts. In the Casamance basin, particularly in the Djibonker and Agnak watersheds, these have considerably modified their hydrological behavior. They favored a change in runoff and environmental changes around the said backwaters. Since then, populations, in particular farmers, have been trying to provide answers by developing agricultural activities that are resilient to hydro-climatic variability and to changes in watersheds. The other general objective of this study is to understand the hydrological functioning and sediment supply of the Djibonker and Agnak backwaters in the face of environmental and socio-economic changes in the adjacent territories. A diversified methodological approach was adopted based on multiple geospatial and socioeconomic data and spatial analysis tools. A campaign to monitor the concentration of sediments in the backwaters was conducted over a period of twelve (12) months. Socio-economic surveys were carried out on 321 households, a total of 25% of households distributed in 13 villages and supplemented by interview guides. They helped to complete the cartographic analyzes made in this work, with the use of Arcgis, HEC-HMS, Hydraccess and Excel processing tools. The results obtained indicate that the area is marked by an irregularity in precipitation and a variation in water storage in relation to the flows determined by the HEC-HMS model which goes from 120.3m³/s in 2004 to 388, 4m³ in 2020 in Agnak and from 48.6m³/s to 231.9m³/s in Djibonker. This evolution of runoff is in phase with the dynamics of land use in the basins studied. Statistical analyzes show that the concentration of suspended solids in the wet season and in the dry season is significantly different. Faced with this situation, local communities have implemented methods of erosion control and water and soil conservation to better develop their agricultural activities, particularly in the dry season. Statistical analyzes show that the concentration of suspended solids in the wet season and in the dry season is significantly different. Faced with this situation, local communities have implemented methods of erosion control and water and soil conservation to better develop their agricultural activities, particularly in the dry season.

Keywords : Hydrological functioning, erosion, suspended matter, changes, watershed, Lower Casamance.

INTRODUCTION

La connaissance des ressources en eau disponibles au niveau des hydrosystèmes continentaux est d'un intérêt capital. La connaissance et la quantification du potentiel hydrique apparaissent indispensables pour le développement des territoires, surtout dans les pays en développement. L'Afrique est la région où subsistent les plus grands défis en matière de disponibilité, d'aménagement et de distribution des ressources en eau (Karambiri, 2017). Le manque de suivi et l'absence de cadre de gestion communautaire mettent en péril toutes les politiques en matière de gestion des ressources en eau et de mise en place d'infrastructures.

A ces contraintes, s'ajoutent d'autres facteurs (climatiques, anthropiques, socio-économiques, etc.) aux conséquences importantes sur la disponibilité des ressources en eau. Sous ce registre, les aléas climatiques contribuent significativement à la modification du fonctionnement des cours d'eau, globalement tributaires de la pluviométrie. La variabilité climatique et ses conséquences directes ont considérablement affecté les eaux superficielles disponibles. De nombreuses études ont souligné l'irrégularité de la pluviométrie, principale source d'approvisionnement des cours d'eau en région ouest-africaine (Soro *et al.*, 2011 ; Diagne, 2000 ; Dacosta *et al.*, 2002 ; Ndong, 2002 ; Bodian, 2014 ; Faye *et al.*, 2015 ; Sané *et al.*, 2020). Elle a entraîné la modification du cours normal et une baisse des niveaux piézométriques et une chute des débits des rivières (Ndong, 1995 ; Servat *et al.*, 1998 ; Mahé et Olivry, 1999 ; L'Hôte *et al.*, 2002 ; Lebel et Vischel, 2005 ; Sow *et al.*, 2007). La communauté scientifique semble d'accord sur le fait que ces événements extrêmes vont s'accroître sous l'effet des changements climatiques, d'où une inquiétude grandissante de l'opinion publique face aux impacts de ces changements sur les ressources naturelles et, particulièrement, sur les ressources en eau (Chaponnière, 2005). Ces préoccupations autour de la menace hydro-pluviométrique ont entraîné une mobilisation importante de projets et programmes autour de la ressource eau dans le monde. De la charte européenne de l'eau proclamée le 6 mai 1986 par le Conseil de l'Europe qui stipule que « la gestion des ressources naturelles en eau devrait s'inscrire dans le cadre du bassin naturel plutôt que dans celui des frontières administratives et politiques » au sommet de Rio 1992, des décisions et mesures importantes ont été entérinées en vue d'une large intégration des éléments physiques et biophysiques dans la gestion des ressources en eau. En ce sens, des organisations comme le Réseau International des Organismes des Bassins (RIOB) sont

créées pour mieux susciter l'implication des politiques et des communautés dans la gestion des ressources en eau des bassins versants. Pour une meilleure optimisation des ressources en eau entre territoires transfrontaliers, l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal est créée en 1972. L'OMVS a donné naissance à deux barrages à vocation hydro-agricole et hydroélectrique (Diama et Manantali) permettant de développer l'agriculture irriguée autour des terroirs en stress hydrique. En Casamance, la baisse des pluies et des écoulements du fleuve Casamance et la faible topographie ont en partie entraîné l'intrusion de la langue salée à l'intérieur des terres de cultures. La vulnérabilité de l'environnement biophysique de la Casamance tient d'abord à sa forte dépendance vis-à-vis des conditions climatiques, notamment des précipitations qui ont connu une diminution sensible depuis la fin des années 1960 privant ainsi au fleuve d'abondants ruissellements sur son cours supérieur (Sané et Mbaye, 2007).

Face à ces contraintes accentuées par la variabilité hydroclimatique, on accorde un intérêt particulier à l'étude des effets à la variabilité pluviométrique et les changements d'états de surface dans les bassins hydrographiques. De plus, la forte acuité du problème fait qu'il est difficile de faire une distinction entre les impacts liés aux variations des paramètres climatiques et ceux liés aux activités humaines sur les bassins versants. Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant dépend de nombreux paramètres variables dans le temps et dans l'espace. On peut citer les conditions climatiques, les caractéristiques physiques du bassin, ainsi que l'aménagement et l'occupation des sols (Kouassi *et al.*, 2013). La diversité et la complexité des processus entrant en jeu à l'échelle du système naturel, la variabilité climatique et la dynamique de l'occupation des sols, rendent toute étude hydrologique difficile, et imposent l'emploi d'outils pertinents comme les modèles.

Contexte géographique

Située dans la zone sud-soudanienne, la Casamance est caractérisée par son important potentiel pluviométrique compris entre 1000 et 1500 mm. A l'Ouest, les plateaux du Continental Terminal sont largement entaillés par le réseau hydrographique structuré autour du fleuve Casamance et de ses émissaires, les *bolongs* (Cormier-Salem, 1989). L'importance du chevelu hydrographique et des précipitations sur le développement des paysages de la Casamance, lui confèrent le statut de zone à grande potentialité agricole du Sénégal. Antérieurement aux années sèches, la Basse-Casamance, et particulièrement le domaine

fluvio-marin, offrait une végétation relativement abondante. Les populations en tirent fort bien parti et les perspectives de développement semblaient sérieuses, certains documents officiels faisant même de la Casamance le futur grenier à grains du Sénégal (Boivin, 1990). Durant la période de sécheresse, on a observé la disparition brutale de *Rhizophora* dans les zones amont des marigots et la pénétration du front salé très loin en amont dans la Casamance qui a fait dépérir de nombreux palmiers (Marius, 1979). De nombreuses rizières qui avaient été récupérées sur la mangrove ont été envahies par les sels et totalement abandonnées pendant plusieurs années (Marius, 1979). L'extension de la sécheresse en Casamance est mise en évidence par des déficits pluviométriques prononcés (Ndong, 1995). Aujourd'hui, le dysfonctionnement hydrologique fait que le fleuve Casamance fonctionne comme une véritable ria caractérisée par de fortes concentrations de sel sur l'essentiel de son grand bassin versant affectant les terrains adjacents (Sané *et al.*, 2010). De par ces problèmes environnementaux aigus, des projets et programmes de recherche ont été orientés dans le bassin de la Casamance entre 1973 et 1992. C'est en ce sens que l'ISRA et l'IRD (ex ORSTOM) avaient œuvré pendant plus de 30 ans dans l'étude et l'élaboration de projets conjoints pour faire face à la sécheresse, surtout en Basse-Casamance. En 1988, une étude d'expérimentation a été effectuée dans la vallée de Djiguinoum. Les études sur les bilans hydrologiques, réalisées avant les observations de Djiguinoum, ont toutes eu pour objet des bassins versants continentaux. Toutes les tentatives de bilans hydrologiques sur de petits bassins-versants non barrés et influencés par la marée ont échoué, faute d'insuffisance et de précision des mesures de débits pour déceler l'écoulement propre du bassin au cours d'un cycle de marée (Albergel *et al.*, 1991).

Ainsi, à l'heure où s'installent des interrogations sur le comportement hydrologique et sédimentaire, et la gestion communautaire de l'eau autour des bassins versants, il nous a semblé intéressant de mener une étude orientée sur les marigots à écoulement intermittents assujettis à d'importantes mutations environnementales et socio-économiques. L'étude est faite sur la base de :

- une caractérisation morphométrique des bassins ;
- une analyse de la situation climatique actuelle en Basse-Casamance ;
- une identification des zones potentielles en eau souterraine et inondables des bassins d'étude ;

- une quantification et un suivi de la dynamique des matières en suspension sur une période de douze mois ;
- une indication des contraintes du ruissellement et de ses impacts socio-économiques ;
- une indication des stratégies d'adaptation et de gestion des ressources en eau dans les deux bassins.

Une telle problématique suscite des interrogations suivantes :

- Comment se comportent les paramètres morphométriques dans les bassins versants ?
- Quelles sont les dynamiques en cours dans ces bassins dans un contexte de changement climatique ?
- Quels acteurs et quelles stratégies pour une gestion communautaire de l'eau à l'échelle des bassins versants non jaugés ?

L'objectif général de cette thèse est de comprendre le fonctionnement hydrologique et les apports sédimentaires des marigots de Djibonker et d'Agnak face aux mutations environnementales et socio-économiques des territoires adjacents.

Cette étude hydro-sédimentaire de ces bassins consiste à évaluer leurs potentiels en eau, comprendre le processus de ruissellement, de transfert des eaux et de flux des sédiments au niveau des différentes parties des bassins. Étant confronté à l'absence de données hydrométriques et l'enregistrement de données hydrométriques trop lacunaires, l'approche est facilitée par une transformation (traitement) des données pluviométriques en débit (modélisation) afin d'analyser le comportement hydrologique des deux bassins. En amont, un traitement et une analyse des variables morphométriques seront effectués à partir d'une image SRTM. Cette démarche entre dans la logique de déterminer les composantes physiques de chaque bassin versant pour une bonne détection des réponses hydrologiques à partir d'une série de données.

La deuxième approche consiste à analyser l'efficacité des techniques initiées par les populations dans la gestion des eaux des vallées. Pour conduire cette étude, trois objectifs secondaires aideront à atteindre les résultats escomptés :

1. évaluer le potentiel en eau des bassins en rapport avec la dynamique des territoires adjacents :

- étudier l'importance de la disponibilité de l'eau dans les terroirs ;

- analyser l'évolution des paramètres climatiques ;
 - déterminer les ressources en eau souterraine et le risque d'inondation dans les bassins versants ;
 - simuler le ruissellement dans les deux bassins.
- 2. analyser les mutations environnementales et socioéconomiques qui découlent du fonctionnement hydrologique et morphosédimentaire dans les deux bassins :**
- établir une cartographie de l'occupation des sols des vallées et terroirs ;
 - quantifier les flux sédimentaires dans les marigots en relation avec la modification des caractéristiques physiques de la zone ;
 - analyser les mutations socio-environnementales.
- 3. examiner les contraintes liées à la gestion de l'eau et les initiatives de gestion de l'eau initiées par les communautés locales :**
- identifier les différents acteurs autour des activités liées à l'eau ;
 - mettre en évidence la perception paysanne ;
 - déterminer les modes de gestion de l'eau et les contraintes qui leur sont associées.

Hypothèse générale : L'étude part de l'hypothèse globale selon laquelle la variabilité hydro-pluviométrique actuelle et la dynamique des pratiques sociétales déterminent le fonctionnement hydro-sédimentaire des bassins des marigots de Djibonker et Agnak.

Hypothèses spécifiques

- Le fonctionnement hydrologique est en phase avec la variabilité climatique, la dynamique du milieu et les pratiques sociétales.
- Les impacts des caractéristiques hydrologiques actuelles des deux bassins versants résultent du changement climatique et des pratiques sociétales.
- L'absence d'une coordination autour des vallées constitue la source des problèmes de gestion communautaire de l'eau.

Tableau 1: Cadre opératoire de la recherche

Questions de recherche	Hypothèses	Indicateurs	Variables	Données ou outils mis en œuvre
Comment déterminer les variables morphométriques	Le fonctionnement hydrologique est en phase avec la	-la forme des deux bassins versants -hypsométrie -le dénivelé	- la pente - le périmètre -l'altitude	-Image SRTM (MNT) -Base de données <i>sol</i>

es des bassins versants ?	dynamique du milieu et les pratiques sociétales	-la nature des sols	-l'indice de Gravelius (Kc)	
Comment évaluer les dynamiques en cours face au changement climatique ?	Les impacts des caractéristiques hydrologiques actuelles résultent du changement climatique et des pratiques sociétales	- occupations des sols -Densité de drainage -Intensité des précipitations -Texture des sols - Géomorphologie -Géologie	-Carte d'occupation des sols 1968, 2004 et 2020 - Carte de des pentes -carte de pertes des sols -Carte des indices d'inondation	-Images Corona, Earth,
Quels acteurs pour une gestion communautaire de l'eau à l'échelle des bassins versants non jaugés ?	La faible compréhension de la notion de bassin versant et l'absence d'une coordination autour des vallées constituent la source des problèmes de gestion communautaires de l'eau	-activités tributaires de l'eau -comité de gestion d'eau -groupements de producteurs de vallées	-techniques de gestion de l'eau (zaï manuel, culture en planchette, Billonnage) -	- Questionnaire -SWOT -Matrice multi-acteur (Fraction Mapping)

Le travail est structuré en trois grandes parties qui traitent chacune des questions en rapport avec le fonctionnement hydro-sédimentaire des bassins versants étudiés et des activités pratiquées par les habitants des terroirs des bassins versants.

La première partie de ce travail porte sur le cadre théorique, les caractéristiques socio-économiques et physiques du milieu d'étude. Pour les études en hydrologie, il est classique de se limiter aux éléments physiques des bassins versants du fait qu'ils constituent des paramètres fondamentaux à la connaissance de leur fonctionnement hydrologique. Aussi, l'historique des localités de la zone étudiée permet-il de mieux comprendre l'évolution des états de surface et les pratiques anciennes en rapport avec l'eau. C'est à ce titre que nous avons également analysé ici les caractéristiques socioéconomiques de la zone d'étude.

Cette analyse aide à mieux saisir les mutations sociales en cours.

Le chapitre 1 est consacré au cadre théorique de l'étude qui met l'accent sur le fondement scientifique de ce travail. Il s'agit de l'état de l'art, de la discussion conceptuelle et de la démarche méthodologique adoptée dans ce travail. Pour tout travail scientifique, la revue des travaux scientifiques ayant abordés une thématique similaire rend solide la position du problème. Cette revue aide également à la compréhension des éléments intégrés dans le corps du document.

Le chapitre 2 est axé sur les variables morphométriques qui sont mis en corrélation avec les variables linéaires (chevelus hydrographiques). Il est consacré aussi à un rappel de l'évolution géologique du bassin de la Casamance, l'analyse des variables pédologiques, des variables géomorphologiques qui sont des éléments importants dans une étude hydrologique.

Le chapitre 3 est consacré à l'analyse de la tendance hydroclimatique actuelle sur la Basse-Casamance. Il s'agit d'une analyse de l'évolution mensuelle, interannuelle et décennale de la pluviométrie de 1951 à 2019. Une analyse par indices pour les différentes périodes est faite aussi afin de mettre en évidence les années de rupture dans les séries pluviométriques. Dans la seconde sous-section du chapitre, nous avons analysé l'évolution des températures et avons estimé les variables hydrologiques par les méthodes de Tixeront-Berkaloff et Thornthwaite.

La deuxième partie porte sur le diagnostic global des ressources en eau superficielles et souterraines disponibles dans les bassins étudiés. La méthode d'interpolation a été appliquée, dans le but d'avoir une idée sur la disponibilité de la ressource à l'échelle de ces deux bassins. Les outils d'analyse spatiale ont été mis à contribution pour représenter les variations du stockage d'eau à partir des données GRACE de même que l'estimation du potentiel en eau souterraine par l'indice GWPI (Géologie, sol, Utilisation des terres, densité de drainage, densité des couches linéaires, la pluviométrie, pente, géomorphologie) et la représentation des sites inondables par la méthode FIGUSED (Flux des eaux, Intensité des Précipitations, Géologie, Occupation des sols, Pente). Dans la dernière section du chapitre, nous avons procédé au calcul du débit en période de crue dans les bassins de Djibonker et Agnak à partir du modèle global HEC-HMS, à la quantification des flux sédimentaires et à l'estimation du poids de sédiments érodés et susceptibles d'être érodés ainsi que la granulométrie des particules en suspension.

La troisième et dernière partie porte sur la dynamique des états de surface du sol, les mutations qui leur sont associées et la cartographie des risques de ruissellement et d'érosion du sol dans les deux bassins. Le premier chapitre met en évidence l'occupation des sols établie à l'aide de l'imagerie géospatiale multidate. Le deuxième chapitre porte sur l'érosion des sols réalisée sur la base de la méthode USLE. Enfin, le dernier chapitre est consacré aux mutations observées dans les territoires autour des vallées et aux techniques de gestion de l'eau développées par les acteurs (populations, partenaires au développement, État).

PREMIÈRE PARTIE

CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET SOCIO- ÉCONOMIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE

Dans une recherche scientifique, il est important de faire la revue globale des travaux antérieurs. Ce travail de synthèse littéraire aide à bien cerner les questions de recherche, à mieux justifier le choix scientifique et les objectifs de la recherche. Cette partie aborde la problématique de l'étude, la discussion des concepts et la caractérisation du milieu d'étude. Le chapitre 2 aborde les caractéristiques physiques à savoir la morphométrie des bassins, l'évolution géologique, la géomorphologie, la pédologie et l'état des formations végétales. L'analyse de la tendance climatique décrivant les paramètres comme la température et la pluviométrie et l'estimation des variables hydrologiques terminent cette partie.

CHAPITRE I : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES SOCIO-ÉCONOMIQUES DES BASSINS VERSANTS ÉTUDIÉS

Ce premier chapitre est consacré aux fondamentaux scientifiques axés sur la revue documentaire, la discussion conceptuelle et la démarche méthodologique. La dernière partie du chapitre met en évidence l'historique, l'évolution démographique et les activités socio-économiques menées par la population locale.

I.1. Etat des connaissances de l'étude

L'importance de la problématique de recherche liée à la détermination du processus de l'eau dans un bassin versant, sa réaction face à une sollicitation et les différentes interrogations associées à sa disponibilité et à sa gestion ont amené bon nombre de chercheurs à s'intéresser à ces thématiques. Ainsi, à travers la littérature scientifique, la question de la gestion de l'eau, le processus et les facteurs qui régissent l'écoulement dans un bassin versant ont été abordés à plusieurs échelles.

Neuvy (1991), dans son ouvrage intitulé « *L'homme et l'eau dans le domaine tropical* », a analysé le déroulement du cycle de l'eau et a divisé les ressources en eau en trois (3) catégories : eaux continentales de surface, eaux souterraines et eau atmosphérique. Selon lui, les besoins en eau sont plus élevés en milieu urbain qu'en campagne. Il a aussi souligné les nuisances liées à l'eau (maladies et inondations) qui peuvent affecter l'homme et son milieu (érosions) et a montré les techniques de la maîtrise de l'eau dans le domaine de l'agriculture. Pour faire cette étude descriptive, il s'est basé sur la fréquence des précipitations qui deviennent parfois dévastatrices pour l'homme pendant les saisons de pluies et qui nécessitent certainement une bonne gestion. Cependant, la situation est compliquée pendant les saisons sèches où la demande en eau est plus forte.

Ambroise (1998), dans « **Dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant** », revient sur le processus de l'eau dans un bassin versant. Dans l'introduction de l'ouvrage, il explique les trois fonctions majeures qui régissent le comportement des bassins versants : le stockage, le transfert et la transformation de l'eau assurés par les compartiments physiques d'un bassin (versants, pentes et talwegs linéaires). On le dénomme, le processus hydrologique qui se particularise par ce que l'auteur appelle **les éléments d'apports d'eau à la surface** c'est-à-dire les précipitations, principaux éléments de l'eau des bassins versants. Par processus de l'eau dans le bassin versant, Ambroise fait référence aux différents éléments venant en

contribution ou en support au volume d'eau initial du bassin. La quantité d'eau nouvellement apportée par les précipitations provoque des réponses hydrologiques très différentes selon les conditions hydrologiques de départ. Le second processus consiste à **l'écoulement dans les versants** assujettis à la nature du sol du bassin-versant étudié. On comprend à travers cette étude que l'intensité de l'écoulement est intrinsèquement liée à la nature du sol et à sa réaction face à la sollicitation de départ. Également, la forme des versants peut aider dans la connaissance du temps de concentration de l'eau dans un bassin versant. C'est ce qu'Ambroise précise en soulignant que « dans un versant, tout niveau moins perméable dans le profil de sol favorise aussi par l'accumulation d'eau résultante et sa pente propre l'existence de gradients latéraux de potentiel hydraulique total et, en conditions non saturées, une augmentation relative de la conductivité hydraulique ». L'ouvrage examine également le sens des relations nappes et rivières dans un bassin versant, qui semble dégager des corrélations extrêmement importantes dans le maintien de la teneur en eau des bas-fonds. En effet, en période d'étiage, l'écoulement initial ou de base des cours est alimenté par les nappes à travers le drainage souterrain. Si la réserve de la nappe est faible c'est-à-dire son stockage lent, le sol supporte ce drainage. Toutefois, dans ce processus, on enregistre pratiquement des pertes de volumes d'eau. Elle représente la dernière phase du cycle de l'eau dans un bassin versant, appelé **évaporation et évapotranspiration**. Tous ces phénomènes interagissent à des périodes différentes en fonction des caractéristiques physiques et climatiques de la zone d'étude. Cette étude constitue un support pour tout chercheur en hydrologie de surface. Les notions de base en hydrologie, le processus de l'eau dans un bassin versant ont été abordés intégralement dans ce travail. Pour cette étude, l'aperçu des facteurs qui régissent l'écoulement de l'eau dans un bassin versant, renforce notre problématique de départ et aide à mieux cerner notre thématique de recherche.

Musy (1998), « **Hydrologie Appliquée** », rappelle les mécanismes de génération de crues des rivières qui commencent par des interrogations tirées de (Penman, 1963) : Quel est le devenir de l'eau des pluies ? Quel est la provenance de l'eau des rivières (Hewlett, 1961) ? Musy tente de répondre à ces questions en appliquant le principe du cycle de l'eau. Des pluies aux différentes formes d'écoulement ou de ruissellement de l'eau dans un bassin versant, l'eau des rivières est principalement alimentée par les différentes formes de précipitations. L'auteur fait comprendre que dans l'analyse des processus hydrologiques, à savoir les processus de génération de crues des cours d'eau surtout à écoulement pérenne,

l'apport des précipitations est très soutenu. Par conséquent, il peut décroître en fonction de la nature du cours d'eau (temporaire ou pérenne) mais également en fonction des ramifications secondaires. Musy rappelle que l'ensemble de l'eau de pluie qui tombe dans un bassin versant ne contribue pas totalement au ruissellement ni à l'écoulement. Cette pluie dénommée "pluie nette ou pluie efficace" est déterminée par ce qu'il appelle **fonction de production**. Elle peut être calculée à travers une estimation ou une modélisation hydrologique. Elle consiste en une transformation du hyétogramme en hydrogramme de crue. Cela constitue de facto, une connaissance initiale des précipitations brutes du bassin versant. Dans l'application de modèles hydrologiques, approche presque généralisée par les hydrologues, Musy a accordé un chapitre intégral aux définitions des modèles et une revue des typologies de modèles. Pour lui, la grande diversité des modèles complique le choix d'un tel outil pour une application donnée. Le choix d'un modèle doit s'effectuer en règle générale en fonction de l'objectif de l'étude hydrologique et de sa simplicité. La problématique que l'on traite aide au choix du modèle hydrologique à appliquer. Pour la mise en œuvre d'un modèle, les quatre étapes suivantes sont fondamentales, selon Musy : la **préparation des données** d'entrée du modèle, l'estimation des paramètres nommée le **calage** ou la **calibration** du modèle, la **validation** du modèle, et son **exploitation** proprement dite.

Dans « **Hydrologie de Surface** », Roche (1963) esquisse les principes de base en hydrologie et insiste sur les calculs et les probabilités en statistiques appliquées à l'hydrologie. En amont, les méthodes de calcul des précipitations dans un bassin versant à travers plusieurs formules d'entrée sont traitées. Roche a abordé également la complexité physique du bassin versant, un espace dont les limites sont tributaires des caractéristiques physiques et conditions climatiques du milieu. C'est à ce titre que Musy (1998) affirme que le bassin versant fonctionne comme un collecteur chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement vers l'exutoire. Cette transformation ne va pas sans perte en eau, d'autant plus qu'elle dépend des conditions climatiques régnant sur le bassin, mais aussi des caractéristiques physiques. A cette complexité, s'ajoutent les axes d'intérêt de l'hydrologue qui se limitent le plus souvent au bilan (le volume d'eau arrivé à l'exutoire) et à l'hydrogramme (le temps que parcourt cette eau pour atteindre les parties inférieures du bassin). L'auteur passe également en revue les caractéristiques morphométriques et donne un aperçu sur les techniques de calcul et d'analyse des paramètres hydrologiques.

Bovin Pascal (1990) « **Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance-Sénégal) : étude de la variabilité spatiale et relations avec les caractéristiques pédologiques** ». Cette étude a été menée dans une petite vallée, aménagée depuis 1983 dans le cadre du Projet Intégré de Développement Agricole de la Casamance (PIDAC). Bovin s'est intéressé aux transferts de l'eau et particulièrement aux caractéristiques physicochimiques des sols dans cette vallée. L'étude expérimentale qu'il a effectuée a permis de déduire la nature sulfatée des sols de la vallée de Katouré. La sécheresse a façonné le cours de la Casamance, au début des années 1970, et a amoindri la superficie de terres arables jadis destinées à la riziculture. Pour limiter les dégâts occasionnés par l'avancée de la langue salée, Bovin explique que la mise en place du barrage a sécurisé et amélioré la production de riz dans la partie amont, tandis que les rizières en aval du barrage connaissent des problèmes croissants. La progression de la salure, d'après Bovin, n'est pas le seul phénomène mis en cause. En effet, des sols acides et non salés se développent également, des mortalités de 100% dues à une toxicité aluminique sont constatées au moment du repiquage. Même si l'étude de Bovin s'était limitée sur une parcelle de 8 ha, actuellement la salure a fortement gagné d'importantes superficies dans cette vallée. La partie amont, où nous effectuons périodiquement nos campagnes de mesures de matières en suspensions, semble moins salée. Les autochtones y exploitent leurs parcelles rizicoles. L'étude de Bovin, donne une idée sur les caractéristiques physiques de cette vallée. Également, l'approche semble être pertinente pour la connaissance de l'origine des flux sédimentaires en amont de l'exutoire du bassin de Djibonker. Mieux encore, dans l'analyse des matières en suspension, les résultats de Bovin peuvent aider dans l'interprétation des composantes physico-chimiques des sols échantillonnés.

Amidou (2013), dans « **Caractérisation des composantes du cycle de l'eau et processus de production de l'écoulement : cas du bassin transfrontalier de Kolondiéba au sud du Mali, en milieu tropical de socle** » fait le lien entre les phénomènes climatiques et caractéristiques des formations végétales d'un bassin versant représentant le point d'entrée d'une analyse du comportement hydrologique des bassins versants. La littérature existante sur la zone soudano-sahélienne relate globalement une diversité d'écoulements influencés par la nature des bassins et la variabilité climatique à l'échelle locale. Dao (2013) révèle qu'effectivement, la variabilité hydro-pluviométrique a affecté considérablement le niveau des nappes et a diminué le volume des eaux de surface dans le bassin de Kolondiéba. Il a

démontré qu'il peut bien exister une corrélation entre le volume d'eau précipité, l'écoulement et le temps de réaction d'un bassin versant face à une pluie. La forte proportion de surfaces dénudées et d'activités agricoles intenses dans le bassin a suscité une analyse diachronique des états de surface dans le Kolondiéba. Dao (2013) précise que, dans le processus qui régit l'écoulement dans les rivières, les mesures à l'exutoire ne permettent pas à elles seules d'expliquer les modalités d'acheminement. Il faut procéder à la séparation de l'hydrogramme unitaire ce qui consiste à tenir compte de l'intensité, de la durée et des conditions climatiques de la zone. Pour une bonne analyse de l'écoulement d'une rivière quelconque, regrouper tous ces facteurs conditionne la validité de l'interprétation des débits à quantifier ou à escompter. Actuellement, le modèle hydrologique empirique ou global facilite la détermination des écoulements dans les rivières moins suivies comme celles retenues dans notre étude.

En Casamance, le cours principal du fleuve du même nom, a subi une modification au courant de la période 1968-1998. Ces affluents, jadis permanents, ont été fortement affectés par l'eau du fleuve. Globalement, le phénomène s'est étendu jusqu'aux abords de Diana Malari aux confins de la région de Kolda. Ainsi, les territoires adjacents à ce cours d'eau ont été affectés par l'eau salée. Il faut signaler qu'on dispose d'une documentation relativement faible sur des études hydrologiques qui parlent des dynamiques d'écoulement dans le bassin de la Casamance.

Dacosta (1989) « **Précipitations et écoulement sur le bassin de la Casamance** », précise que les mesures des précipitations ont débuté en 1905 (Sédhiou), 1918 (Ziguinchor), 1922 (Kolda). Dans ce même cadre, Brunet Moret (1963) a largement fait une analyse fine des formes de précipitations et leur genèse en Casamance.

Dans le domaine hydrologique, la plus ancienne station hydrologique en Casamance fut celle de Kolda (1962). A part celle-ci, les stations qui ont vu le jour disposent soit des données à des dates courtes soit des données trop lacunaires. En Basse-Casamance, les vallées de Djiguinoum, de Baïla, de Guidel et de Nyassia ont été étudiées dans le cadre des projets de l'ORSTOM (actuel IRD) entre 1974 et 1996 (Bovin et Barry, 1988 ; Albergel, 1988 ; Dacosta, 1989 ; Montoroi, 1990). Toutefois, nous avons constaté que les échelles limnimétriques et les mini stations hydrométriques installées sont aujourd'hui en train d'être réhabilitées et installées par la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources

en Eau (DGPPE). Ces publications ou études hydrologiques menées sur les bassins versants se sont intéressées à la fois au processus de l'eau, aux formes de précipitations et à la genèse des écoulements.

En revanche, les rapports entre fonctionnement hydrologique, dynamique sédimentaire et pratiques sociétales n'ont nullement été prises en compte dans la zone. C'est à ce niveau que se trouve l'intérêt scientifique de notre étude sur la Basse-Casamance où pratiquement les ressources en eau superficielles sont importantes et affectées par l'intrusion de la marée saline.

Karambiri (2017) « **Variabilité climatique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sourou au Burkina-Faso** » révèle que le Burkina-Faso est un pays à faible potentialité hydrique et à ressources en eau fortement tributaires de la pluviométrie. Les recherches menées par Karambiri étaient réalisées dans un contexte de paradoxe sahélien. Il démontre comment les communautés et toutes les parties prenantes gèrent la ressource en dépit de la variabilité climatique et des conflits qui naissent entre communautés. A travers une diversité d'approches, l'auteur a démontré que les facteurs liés à la baisse du potentiel des ressources en eau sont d'abord d'ordre climatique (diminution et faible intensité de la pluviométrie) qui entraîne la diminution des écoulements dans le bassin du Sourou. Les modèles de prévision et d'estimation des écoulements sont appliqués en regroupant les paramètres climatiques (températures, pluviométrie) pour démontrer la dynamique des écoulements dans le bassin du Sourou. Par ailleurs, à l'issue des travaux de Karambiri, il ressort différents modes de gestion de l'eau développés par les communautés et les acteurs concernés autour du bassin du Sourou : la gestion de ressources en eau (retenues d'eau construites), la gestion agricole (aménagements hydro-agricoles), la gestion traditionnelle ou communautaire (exploitants agricoles, éleveurs, etc.). Les populations et les acteurs ont adopté des techniques d'économie d'eau dans le bassin. Il s'agit, selon l'auteur, de techniques d'irrigation qui gaspillent moins d'eau et l'utilisation de techniques de conservation des eaux et des sols. Ces méthodes semblent efficaces et pourront aider les différents usagers de l'eau. La gestion intégrée de la ressource en eau doit impliquer toutes les parties prenantes en amont et en aval et ceux qui polarisent le territoire naturel (bassin versant) d'étude.

Alamoso (2017) « **Conflits d'usage dans le bassin béninois du fleuve Niger en Afrique de l'Ouest dans le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau** ».

Dans un contexte de variabilité hydro-pluviométrique, la gestion de la ressource exige l'implication de plusieurs acteurs à des échelles différentes et l'application de lois et règlements en vue d'une gestion durable. Alamoso aborde son travail en se basant sur l'approche participative de la gestion de l'eau au Bénin. Après avoir fait l'état des ressources en eau disponibles, l'auteur montre la nécessité d'appliquer le principe de GIRE dans sa zone d'étude pour limiter les conflits d'usages d'eau. Il développe une approche mixte couplée de méthodes classiques de statistiques descriptives, d'hydrologie et de climatologie et l'analyse des indicateurs hydro-climatiques et des formes d'utilisation des ressources en eau. L'auteur a démontré que le cadre juridique et réglementaire constitue les facteurs bloquant la gestion efficace des ressources en eau. Pour lui, la maîtrise, le suivi et la gestion des ressources en eau au Bénin est un véritable défi à relever pour un meilleur développement tant sur le plan économique que sur le plan social. N'ayant pas une limite administrative, la gestion transfrontalière de l'eau entre communautés aux préoccupations et demandes en eau inégales provoque souvent des conflits d'usages. En ce sens, l'auteur propose l'application de nouvelles approches pour susciter le plus possible les communautés et les acteurs à gérer l'eau de manière collégiale et durable. Il s'agit de mettre en place des comités locaux de l'eau pour veiller véritablement sur la ressource en eau ; de l'instauration de dialogue entre les différents acteurs en vue de l'adoption de codes de conduites et de réglementation pour une gestion des ressources en eau du bassin ; de la mise en place de base de données de suivi des bassins partagés, etc. On déduit de l'étude d'Alamoso (2017) qu'il faut mieux impliquer et responsabiliser les parties, les acteurs à toutes les échelles possibles du territoire concerné pour bien assurer la gestion efficiente et durable de la ressource en eau qui est une des meilleures solutions pour limiter les conflits d'usages de l'eau.

I.2. Définitions et discussions de quelques concepts

La clarification des concepts qui se rapportent à notre thématique de recherche permet de mieux comprendre les éléments ou mots clés qui s'articulent autour de notre problématique d'étude. La compréhension de ces concepts aidera à mieux asseoir les questions phares de l'étude.

Une « eau » est définie dans le Robert comme un liquide incolore, inodore, transparent et insipide lorsqu'elle est pure. Elle est un liquide composé d'hydrogène et d'oxygène et formant l'hydrosphère à l'échelle du globe, à la suite du rassemblement de molécules gazeuses expulsées dès les premiers millions d'années de formation de la terre (Brunet *et al*, 2004). Selon Vaillant (1973), la véritable eau pure est un liquide comportant uniquement le composé chimique H²O sans la moindre trace de corps, minéral ou organique, et sans aucun microbe. De façon générale, l'eau constitue une question fondamentale en termes d'approvisionnement en eau, d'évacuation et d'épuration des eaux usées, mais aussi en termes d'usages et de pratiques individuelles et collectives (Picheral, 2001). Pareil pour « eaux pluviales » qui est le terme que l'on donne à l'eau de pluie après qu'elle est touchée le sol ou une surface construite ou naturelle susceptible de l'intercepter. Elle est définie aussi dans le code de l'assainissement comme « des eaux de précipitations météorologiques, dont les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques, n'ont pas subi des modifications à la suite de leur utilisation pour les besoins humains, ménagers, agricoles et industriels ». Dans le contexte du changement climatique, l'usage et la gestion de cette eau dans les bassins hydrographiques semblent devenir une réelle complexité. Dans les bassins d'étude, les acteurs s'intéressent à cette eau et son caractère amenuisant inquiète de plus en plus. Il semble ainsi nécessaire de connaître son fonctionnement.

Du point de vue fonctionnement hydrologique, deux périodes se succèdent : l'étiage et la crue. Lors des périodes d'étiage, une forte évaporation entraîne une diminution des débits voir un assèchement, qui peut être hétérogène de l'amont à l'aval de la rivière. Pendant ces périodes d'assèchement, les pollutions provenant des rejets anthropiques peuvent s'accumuler dans les cours d'eau. Les premières crues qui succèdent à l'étiage sont rapides, et des pertes de volumes sont fréquemment observées au cours de leur transfert (Grillot, 2006). Ces éléments régissent le fonctionnement hydrologique des rivières. Dans ce travail, nous considérons le fonctionnement hydrologique comme un phénomène qui prend en compte plusieurs paramètres physiques et humains de notre milieu de travail. A cet effet, pour déterminer ce processus hydrologique et mieux comprendre le ruissellement à chaque section des bassins versants étudiés, il faut s'intéresser aux précipitations, à l'état de l'occupation des sols et des pratiques agricoles, de la pédologie et de la géomorphologie.

- **La dynamique** est un ensemble des forces en interactions et en opposition dans un phénomène, une structure (Le Petit Robert, 2012). Elle est un ensemble des forces qui concourent à un processus ou accélèrent une évolution (Petit Larousse, 2011).

Dans « les mots de la géographie », Brunet *et al.*, (2006) considèrent la dynamique comme étant un changement résultant d'un jeu de forces. La dynamique des territoires se lit et s'analyse dans les changements, dans les localisations d'activités, d'équipements, de populations globales, de catégories de personnes (Ba, 2019).

Pour Levy et Lussault (2003), le concept bien qu'étant assimilé au développement ou au progrès, peut tout de même traduire un déclin. On peut ici retenir la définition de Brunet *et al.* (2013) qui prend en compte les changements, les modifications de structures qui peuvent survenir au sein d'un espace donné, mais en relation avec une force quelconque qui les propulse. A cet effet, on l'associe dans cette étude à l'évolution temporelle des différentes classes d'occupation des sols sur une échelle de temps bien définie. L'eau faisant partie des unités paysagères, son évolution peut être comprise dans ce concept de dynamique. Au-delà des éléments de recherche, le concept de dynamique évoque les mutations qui s'opèrent dans la zone d'étude et les pratiques associées dans les deux bassins versants retenus.

- **Écoulement**

L'**écoulement** est défini dans le contexte de cette étude comme étant « le mouvement d'un fluide ». Son mécanisme est interprété, selon Coste et Loudet (1987) comme la transformation de la pluie en débit. Quant au Petit Larousse (2011), l'écoulement est défini comme un déplacement des eaux sous l'effet de la gravité.

George et Verger (2007) définissent l'écoulement comme un mouvement des eaux continentales sous l'effet de la pesanteur.

Pour Chocat. (1997), on parle d'écoulement pour désigner le mouvement d'une masse d'eau à la surface du sol, dans un bief ou à l'intérieur du sol. Le régime de l'écoulement caractérise les conditions dans lesquelles l'écoulement s'effectue. Nous ne nous intéressons ici qu'aux écoulements unidimensionnels (fonction d'une seule variable d'espace).

Selon Vissin (2007), le débit de la rivière est composé principalement de trois types d'écoulement :

- ✓ l'écoulement direct de surface qui représente le ruissellement. C'est un écoulement rapide ;
- ✓ l'écoulement retardé souterrain, appelé débit de base qui est alimenté par les nappes d'eaux souterraines. C'est un écoulement lent à cause du transit de l'eau dans le sol et le sous-sol ;
- ✓ l'écoulement hypodermique, sous-entend, quant à lui, un écoulement au niveau de la couche superficielle du sol.

Dans cette étude tous ces types d'écoulement seront considérés. En effet, une évaluation de la disponibilité des eaux de surfaces des bassins est réalisée en mobilisant les paramètres comme la géomorphologie, la pédologie, la géologie, les précipitations et l'occupation des sols. Il semble fondamental de corréliser tous ces éléments physiques en vue d'obtenir une appréciation exacte de la disponibilité de la ressource en eau et de la connaissance de l'écoulement dans les bassins versants étudiés.

- **Un bassin versant**

On appelle bassin versant, ou bassin de drainage, d'une rivière considérée en un point donné de son cours, l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point de la rivière (Roche, 1963). Le bassin versant fonctionne comme un collecteur chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement à l'exutoire. Cette transformation ne va pas sans perte en eau et ces pertes dépendent des conditions climatologiques régnant sur le bassin mais aussi des caractéristiques physiques de ce dernier (Roche, 1963).

Il est défini par George et Verger (2007) comme un espace géographique alimentant un cours d'eau et drainé par lui. Brunet *et al.* (2006) dans « *les mots de la géographie* » définissent le bassin versant comme une *désignation technique et précise de tout ou partie d'un bassin hydrographique : c'est toute l'étendue qui est en amont d'une station de mesure et dont les eaux « versent » en ce point*. Chocat (1997) le désigne comme étant un territoire de taille quelconque considéré au regard des phénomènes hydrologiques, et tel que toute l'eau ruisselée sur sa surface s'écoule vers un point unique : exutoire du bassin versant. Ce dernier peut être situé sur un cours d'eau, sur une canalisation ou sur tout autre élément du réseau hydrographique. Un bassin versant correspond au territoire sur lequel l'ensemble des eaux (cours d'eau, ruissellement) s'écoulent et finissent par rejoindre un plan d'eau (zone la

plus basse du territoire). Son contour est délimité par la ligne de partage des eaux qui passe par les points les plus élevés et détermine la direction de l'écoulement des eaux de surface (lac, cours d'eau, milieu humide) que les eaux souterraines. Il constitue donc la meilleure entité pour comprendre une gestion globale et intégrée de l'eau (<http://www.rappel.qc.ca/bassin-versant.html>).

Thibaut (2011) le considère comme « étant donné un réseau d'évacuation des eaux pluviales, artificiel ou naturel, enterré ou de surfaces qui potentiellement contribue à l'alimentation de ce réseau, par ruissellement de surface des eaux d'origine météorologique ». Un bassin versant est donc une portion d'espace où s'organise un système hydrologique. On parle également d'hydrosystème, composé d'éléments géographiques qui y interagissent entre eux par l'intermédiaire du cycle hydrologique : un réseau hydrographique, un climat, un socle géologique, un modelé géomorphologique, une couverture pédologique, une couverture végétale, et enfin, une artificialisation liée à l'activité humaine, en particulier l'agriculture et l'urbanisation (Serrazin, 2006).

Le bassin versant est le cadre spatial de l'hydrosystème. L'analyse hydrologique s'attache à mettre en relation le fait hydrologique (en particulier le débit, ses variations et ses extrêmes) avec les caractéristiques géographiques du bassin versant : surface, topographie, géologie, végétation, sols, occupation des sols. Le bassin versant n'est pas seulement une somme de caractères moyens mais un espace géographique complexe où l'organisation spatiale des caractères géographiques joue un rôle important ; il est donc composé de domaines ou « terroirs hydrologiques » (Lambert, 1996) qui répondent de façon différente aux apports des précipitations et déterminent la réponse propre à chaque cours d'eau face aux impulsions hydrométéorologiques (Veyret, 2007).

Pour Pierre et Fernand (2009), le bassin versant « est un espace géographique alimentant un cours d'eau et drainé par lui-même. Il a pour axe le cours d'eau principal et pour limite la zone de partage des eaux le séparant des bassins versants adjacents.

Par conséquent, en gestion intégrée de l'eau, le bassin versant est défini non plus seulement comme une surface, mais comme un volume d'espace. Il comprend non seulement le territoire sur lequel toutes les eaux de surface s'écoulent vers un même exutoire, mais aussi tout ce qu'il contient, c'est-à-dire les eaux de surface, les eaux souterraines, les sols, la végétation, les animaux ainsi que les humains. Une nappe souterraine située hors du bassin

peut contribuer à l'alimentation de l'écoulement superficiel et influencer sur le bilan hydrologique. Ce qui revient à déterminer l'aire contributive du bassin.

Dans cette étude, nous sommes plus en phase avec la définition de Pierre et Fernand. Pour nous, le bassin versant ne constitue pas seulement cette unité ou entité physique dépendante d'un cours d'eau ou réseau hydrographique, elle intègre tous les éléments biophysiques et associe aussi les facteurs d'ordre anthropique. Elle appréhende le fait géographique dans toutes ses dimensions et sa dynamique. En effet, les actions menées en amont des bassins versants comme les aménagements inadaptés et les mauvaises pratiques agricoles peuvent fortement accentuer ou diminuer la qualité des eaux de ruissellement. Ainsi, les pratiques à risque se répercutent, généralement, en aval et la multiplication de petites perturbations peut modifier considérablement la réponse hydrologique en aval en termes de volume d'eau et de matières associées (Guesri, 2021). En vue d'étudier les rapports eau et activités dans ce contexte de mutations environnementales et socio-économiques, le bassin versant est l'entité géographique adaptée du fait de ces caractéristiques naturelles relativement homogènes. Son intérêt est peu connu des communautés du fait de sa faible prise en compte dans la gestion des ressources en eau.

- Vallée

Dépression allongée creusée par un cours d'eau. Elle peut être sèche ou morte quand aucun cours d'eau constitué ne la draine pas ; aveugle, quand elle se termine en aval en cul-de-sac ; les eaux s'enfonçant sous terre ; suspendue, quand elle ne se raccorde en aval à une vallée plus importante que par une forte rupture de pente, voire un escarpement (Roger *et al.*, 1993). La vallée joue un rôle de réceptacle temporaire de l'eau qui provient des versants. Elle constitue un site de développement d'activités agricoles intenses des bassins hydrographiques. De par la nature des sols, très humides et fertiles, les vallées sont des zones humides à fortes potentialités écologiques et économiques. L'ensemble des terres du lit majeur est nommé *walo* dans la vallée du fleuve du fleuve Sénégal et les cultures de décrues en saison sèche (Boutillier *et al.*, 1962). Dans un bassin versant, la vallée est la zone inondable où la plupart du temps les activités agricoles (riziculture et cultures maraîchères) sont développées par les populations. L'intérêt d'analyser ce concept est dû à son importance à la connaissance de la durée des crues et de la nature du ruissellement dans un bassin hydrographique et pour l'étude de son fonctionnement. En principe, tout écoulement se fait dans le fond de la vallée pour rejoindre l'exutoire du bassin-versant. Aujourd'hui, ces vallées

sont sujettes à exploitation intense par les populations sur presque toute l'année sous de faibles formes d'aménagement collectives.

- **Gestion de l'eau**

La gestion de l'eau dans notre contexte est l'utilisation de l'ensemble de réalisations et la mise en œuvre de stratégies, de mécanismes, ou de techniques pour la mobilisation efficace de l'eau à des fins d'exploitation au profit de l'homme, du bétail et des plantes (des cultures notamment). De ce fait, l'eau par son abondance ou son absence peut être un facteur favorable ou une contrainte au développement des systèmes de production en milieu rural. En ce sens, sa maîtrise et sa gestion devrait être une priorité pour les acteurs des territoires. Cela semble être le contraire car les principes de gestion de l'eau que ce soit communautaires ou individuels sont peu connus et du moins appliqués d'où l'intérêt de l'analyse de ce concept. Or, pour des acteurs dont les activités principales reposent sur la disponibilité de l'eau, le principe de gestion devrait être au cœur des programmes communautaires.

- **Hydrosystème fluvial**

L'hydrosystème fluvial est un concept systémique se rapportant à un tronçon de cours d'eau incluant le lit mineur, le lit majeur, la nappe phréatique et les milieux aquatiques et riverains qu'il contient, au sein du bassin versant. Ce concept interdisciplinaire met l'accent sur les flux d'eau, d'énergie, de sédiments, de nutriments, d'organismes vivants et de matière organique dans quatre dimensions (Arnaud et Schmitt, 2018).

L'hydrosystème est un système complexe dont le fonctionnement intègre l'ensemble des compartiments du bassin, des unités spatiales (lits mineur et majeur, bas-fonds, terrasses, versants ou encore plateaux) interconnectées par un réseau hydrographique ou par l'écoulement souterrain et dont la structure et l'évolution sont intimement liées à la dynamique fluviale passée et actuelle (Mendy, 2004). Nous accordons un intérêt particulier d'aborder ce concept dans l'analyse du fait de sa dimension globale dans la connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versants. L'analyse du comportement hydrologique du bassin versant intègre cette notion de biosystème et son fonctionnement hydraulique et biologique modifié très souvent par les actions humaines. On accorde peu d'intérêt à l'écosystème en particulier aquatique autour des marigots, rivières, etc. sachant qu'il participe au maintien du cycle hydrologique de tout cours d'eau. En intégrant ce

concept dans ce travail, il intègre la réflexion sur les matières en suspension (MES) et leur granulométrie.

- **Marigot**

Le marigot est un bras mort d'un fleuve et/ou lieux bas sujets aux inondations (Petit Robert, 2012). Dans les pays tropicaux, on parle de bras mort d'un fleuve ou d'une rivière, ou mare d'eau stagnante. Brunet *et al.*, (2006) le définissent comme une petite étendue d'eau fermée, une mare souvent dépourvue d'eau pendant la saison sèche. Il peut s'agir d'un étang permanent ou alors d'un bras d'eau d'une rivière qui se transforme progressivement en petites mares, se réduit et disparaît.

Dans un autre domaine, un bras de fleuve défluent qui se perd dans les terres inondables des pays tropicaux humides. George et Verger (2007) considèrent le marigot comme un bras de fleuve défluent qui se perd dans les terres inondables des pays tropicaux humides.

L'analyse de ce concept permet de lever l'équivoque sur les interrogations que l'on note entre les concepts de rivière et de marigot.

- **Ressource en eau**

La ressource en eau est définie comme « l'offre en eau » de la nature, à comparer aux demandes en eau du point de vue social et économique. Il existe des ressources en eau naturelle renouvelables et des ressources en eau naturelle non renouvelables (Margat, 1996). Autrement, elles représentent la quantité d'eau de surface ou souterraine disponible à l'échelle mensuelle ou annuelle dans une région et susceptible de satisfaire les besoins domestiques, industriels, agricoles ou autres (Parcevaux *et al.*, 1990).

Selon Boko (2008), la ressource en eau comprend, au sens large, toutes les eaux accessibles comme ressources, c'est-à-dire utiles et disponibles pour l'homme et les écosystèmes à différents points du cycle de l'eau. Dans ce cas, les ressources en eau sont des eaux souterraines (ou superficielles) renouvelables et disponibles (offre/demande) quantitativement pour la satisfaction des besoins des populations. Les ressources en eau disponibles sont de deux ordres (Karambiri, 2017) : les eaux de surface et les eaux souterraines (nappes phréatiques, nappes profondes).

Les eaux de surface se concentrent, en saison des pluies, dans les bas-fonds argileux. Elles forment des mares qui, pour l'essentiel, ne sont pas pérennes car s'assèchent en début de

saison sèche. Il y a aussi des cours d'eau dont la majorité coule saisonnièrement. De toutes les ressources, les ressources en eau sont les plus vulnérables et les plus menacées du fait que les conditions climatiques, hydrauliques et hydrogéologiques rendent leur gestion très complexe (Atchadé, 2014).

Ainsi, sont considérées comme ressources en eau, les eaux superficielles et les eaux souterraines qui contribuent différemment au fonctionnement hydrologique des bassins versants.

- **Sécheresse**

La sécheresse a des significations différentes en fonction de la spécialité du chercheur et/ou du spécialiste qui traite cette thématique. L'hydrologue qui s'intéresse globalement aux eaux de surface, parle de sécheresse que lorsqu'il constate un déficit en eau de surface de la rivière, du lac ou de la mare étudiée. Il s'agit donc d'une période de temps anormalement sec entraînant une pénurie d'eau dont il résulte un abaissement de l'écoulement des cours d'eau, un abaissement des lacs et des nappes souterraines, pouvant les amener à un assèchement (Wackermann *et al.*, 2005). La sécheresse ne peut se définir seulement par des totaux pluviométriques annuels. Il faut prendre en compte les dates de commencement de la saison des pluies (le total des précipitations doit atteindre 20 mm en 1 ou 2 jours consécutifs), la durée de la saison humide, celle de la période déficitaire. Selon Brunet *et al.* (1993) la sécheresse est une déficience hydrique momentanément inattendue : des précipitations sont inférieures à celles que l'on espérait ou habituellement enregistrées. La sécheresse est par conséquent une séquence caractéristique d'un déficit chronique.

- **Erosion du sol**

L'érosion du sol est un phénomène naturel qui rend compte de certains processus (détachement des particules, transport et dépôt) induits par différents agents érosifs (Guesri, 2021). L'érosion est l'ensemble des phénomènes qui contribuent, sous l'action d'un agent d'érosion (l'eau essentiellement) à modifier les formes de relief que sont les sommets de plateaux, les rebords de plateaux, les talus, les corniches, les terrasses, les versants, etc. Cette modification se fait par enlèvement (ablation) de matières (sols et roches), mais aussi par accumulation de la matière arrachée. Il y a donc pour définir l'érosion, ses formes et ses processus. L'analyse de ce concept est nécessaire dans une étude hydrologique associée aux mutations environnementales.

- **Matière en Suspension (MES)**

C'est la fraction de particules qui reste en permanence en suspension au cours du transport. La taille et la densité de ces matériaux leur permettent, dans certaines conditions d'écoulement, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Ce sont en général des argiles et des colloïdes (Lienou, 2007). Les matières en suspension constituent l'ensemble des matières non dissoutes contenues dans l'eau et maintenues en suspension sous l'action de la turbulence (Lefrançois, 2012).

- **Modèle hydrologique**

Le modèle hydrologique est un procédé qui est nécessairement simplificateur et réducteur de la complexité naturelle. Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution, la plus proche possible, de la situation réelle (Karambiri, 2017).

En hydrologie, comme dans beaucoup de disciplines, les modèles constituent des outils de base, de simulation et de prévision, essentiels à la gestion adéquate des ressources en eau, afin de répondre de manière optimale aux différents besoins et usages des ressources en eau (Perrin, 2000 ; Ardoin, 2004 ; Mathevet, 2005 ; Karambiri, 2017).

Pour nous, le modèle est une représentation des compartiments hydrologiques qui permet de se conformer presque à la réalité. On a choisi d'appliquer un modèle à cette étude afin de compenser la carence en données hydrométriques des bassins versants ruraux étudiés.

- **Simulation**

Reproduction artificielle d'un phénomène, d'une variation, voire d'un avenir possible. La géographie utilise aussi certains modèles de simulation pour observer ce qui est censé se passer lorsque tel ou tel paramètre varie. Dans cette étude, la simulation est faite à travers des données pluviométriques pour analyser le fonctionnement des bassins ruraux non jaugés. Elle est faite après une calibration dans le logiciel de modélisation utilisé. L'absence de données de mesure (*in situ*) de débits a suscité l'intérêt de faire recours à la simulation via la modélisation pour déterminer le comportement des bassins versants étudiés, d'où le sens de la définition de ce concept.

- **Territoire**

Le territoire est un espace délimité, approprié par un individu, une communauté, sur lequel peut s'exercer l'autorité d'entité juridique (État, collectivité, etc.). Le territoire est une notion complexe qui peut être mobilisée pour décrire différentes situations. Il est cependant possible d'identifier certains enjeux qui sont attachés à ce terme comme sa double nature matérielle et symbolique, ses formes d'appropriation, sa configuration spatiale et enfin ses expériences individuelles (Lévy et Lessault, 2013).

- **Vulnérabilité**

Ensemble des conditions et processus résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui augmentent la sensibilité des enjeux d'une communauté, d'une région, d'une nation aux effets des aléas (Ollierou et Quantinet, 2004). Dans le contexte du changement climatique, elle peut être définie comme le degré selon lequel un système est sensible ou incapable de faire face aux effets adverses du changement climatique, y compris la variabilité climatique et les effets adverses (Ouédraogo, 2012).

Aujourd'hui, le concept de vulnérabilité permet de qualifier un état de fragilité des sociétés face aux risques technologiques majeurs et à des changements socio-économiques qui s'accélèrent (Dupont, 2003).

En même temps, la réflexion sur les conditions actuelles de la vulnérabilité sociale nous invite à renouer avec une tâche historique de la sociologie, qui est de comprendre le devenir des sociétés face au changement ; à ce travail essentiellement descriptif et analytique, il est toutefois indispensable d'ajouter une réflexion anthropologique sur la capacité des sociétés spécifiquement humaines, dans les conditions actuelles de généralisation de la vulnérabilité et de l'incertitude (Dupont, 2003). La vulnérabilité devient alors la susceptibilité de subir des pertes dues à l'exposition à une source de menace, donc par extension, le degré d'exposition des enjeux (Veyret, 2007). Le degré d'endommagement varie en fonction de la capacité à faire face de la société. La vulnérabilité renvoie à la notion de sensibilité à un facteur limitant du fait de nombreuses variables interdépendant (Mendy, 2014). Pour le GIEC (IPCC, 2014), la vulnérabilité est la prédisposition à être soumis à des effets néfastes et peut se produire en raison de plusieurs facteurs sociaux ou physiques.

I.3. La méthodologie adoptée dans le cadre des enquêtes socio-économiques

Il est nécessaire d'analyser soigneusement le système de représentations que les individus et les groupes membres d'une société déterminée se font de leur environnement. C'est à partir de ces représentations que ces individus ou groupes agissent sur leur environnement » (Godelier, 1984 ; Ramatou, 2012). La question sociale autour de l'eau est fondamentale, surtout en milieu rural où pratiquement, toutes les activités des occupants sont inhérentes à l'eau. L'entité physique dont cette étude fait objet, abrite des communautés embrassant diverses cultures dont les pratiques sociales et les modes d'organisation des terroirs sont hétérogènes. Les enquêtes qualitatives et quantitatives sont proposées dans cette étude en vue d'apprécier la situation des communautés et les activités qui y sont menées. L'approche a été plus participative, avec une méthode mixte (qualitative intégrant le quantitatif). Elle commence par une visite exploratoire, l'élaboration des outils (questionnaire et guide), le pré-test des outils et les enquêtes proprement dites. Les données de bases des ménages utilisées dans l'échantillonnage des ménages à enquêter sont celles du recensement général de la population de 2013 conduite par l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD) de 2013.

I.3.1. Les visites exploratoires

La première visite de terrain a été effectuée à la période du 08 au 17 Octobre 2020. Elle avait pour objectif d'observer, en premier lieu, les formes d'organisation autour des vallées. En second lieu, identifier les contraintes auxquelles sont confrontées les parties prenantes (populations, collectivités, État et partenaires au développement) pour un développement des activités socio-économiques tributaires de l'eau. Cela étant, nous avons retenu quatre villages pour chaque bassin d'étude. Il s'agit des villages d'Agnak grand, Agnak Petit, Camaracounda, Samick, Toubacouta, Katouré, Darsalam et Mpack.

Dans les terroirs de Camaracounda, Boutoupa et Samick (bassin d'Agnak), les populations n'ont pas abandonné la culture de bas-fonds. Au contraire, elles ont développé des stratégies pour supporter la crise climatique actuelle. A la place du riz dans les vallées, elles se sont lancées dans la culture de la pastèque. Sur la terre ferme, les agrumes et l'anacarde compensent le recul de la monoculture arachidière. Il a été observé aussi de petits aménagements agricoles dans cette vallée, une diguette traditionnelle installée par la population avec l'appui de l'ONG AJAC LUKAL. Par conséquent, aucune station de mesure hydrométrique n'a été identifiée dans ce bassin.

La visite à Djibonker nous a permis de nous imprégner davantage des pratiques sociétales. Dans ce bassin, 6 ouvrages associés à des pistes de désenclavement ont été aménagés dans la grande vallée de Mpack. Au niveau de cette grande vallée de 1300 ha, les populations y ont aménagé de petites exploitations maraîchères et pratiquent une agriculture hors saison des pluies. On y observe des terres faiblement affectées par le sel, et les activités autour des zones sont coordonnées par la population. Par contre, les terroirs identifiés en amont du cours principal (Darsalam, Djibonker et une grande partie des rizières de Katouré) sont fortement affectés par l'avancée de la langue salée.

Ces informations recueillies sur le terrain nous ont aidé dans le choix des sites d'enquêtes et l'élaboration des grandes lignes de notre outil d'enquête, mais également guidé dans le choix des zones à retenir pour la réalisation des cartes de terroirs.

Également, lors de ces visites, des sites de mesure *in situ* ont été identifiés au niveau de chaque bassin versant. Ces sites ont servi de stations de prélèvement d'eau pour la quantification des flux sédimentaires à l'échelle mensuelle.

I.3.2. Techniques d'échantillonnages et unité d'observation

Dans le cadre de nos observations et enquêtes de terrain, nous avons défini un certain nombre de critères pour le choix des sites, le nombre et le groupe de personnes à enquêter dans chaque site retenu.

I.3.2.1. Critères de choix des sites d'enquêtes

Le choix des sites à enquêter en sciences sociales doit reposer sur des fondements solides et une méthode reproductible. Il doit être en phase avec les objectifs du chercheur et la spécificité des zones d'études. Le choix s'est fait par stratification en tenant compte de la position géographique des villages par rapport au cours d'eau principal de chaque bassin. Ainsi, pour faciliter ce choix, nous avons intégré ce qu'on appelle "*les relations de voisinage*" au cours d'eau principal (cours d'eau d'ordre 4 *selon la classification de Strahler*). Des intervalles de valeurs ont été générés pour ressortir des distances entre le réseau principal et les localités des deux bassins (carte 1). En effet, on est parti du raisonnement selon lequel, les limites du bassin versant n'ont rien à voir avec celles administratives, que la zone d'influence du réseau pourrait donner une lecture superficielle des rapports communautaires de l'eau entre terroirs d'un même bassin. De plus, montrer les pratiques de gestion de l'eau que proposent les populations en rapport avec les dynamiques

physiques actuelles. En ce sens, la méthode de zone tampon ou buffers a été choisie pour faciliter l'identification des localités cibles d'enquêtes.

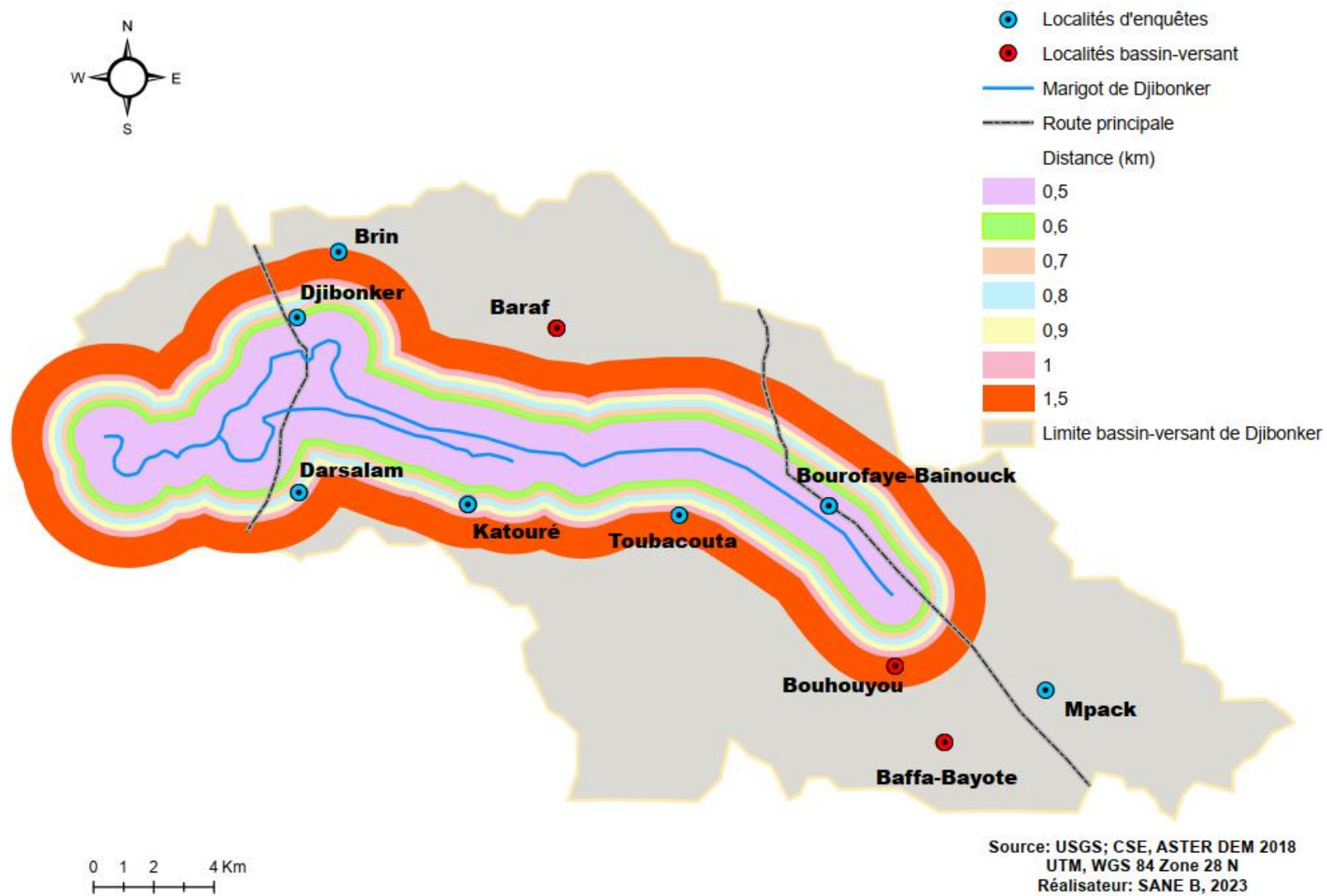
D'autres critères sont intégrés également dans le choix des sites. Il s'agit de :

- la position géographique des villages, un critère déterminant. Pour ce choix, les villages ont pratiquement les mêmes activités socio-économiques, à savoir l'agriculture sous différentes formes ;
- les activités phares des autochtones sont en rapport avec le cours d'eau principal ou sont déterminées par le temps de parcours du cours d'eau ;
- au plan organisationnel, la coordination dans la vallée et la capacité managériale des populations à initier des actions locales pour gérer l'eau nous intéressent fortement. C'est pour cela que la présence d'une infrastructure de gestion de l'eau sur le lit des cours d'eau est intégrée dans le critère de choix des localités à retenir dans l'enquête.

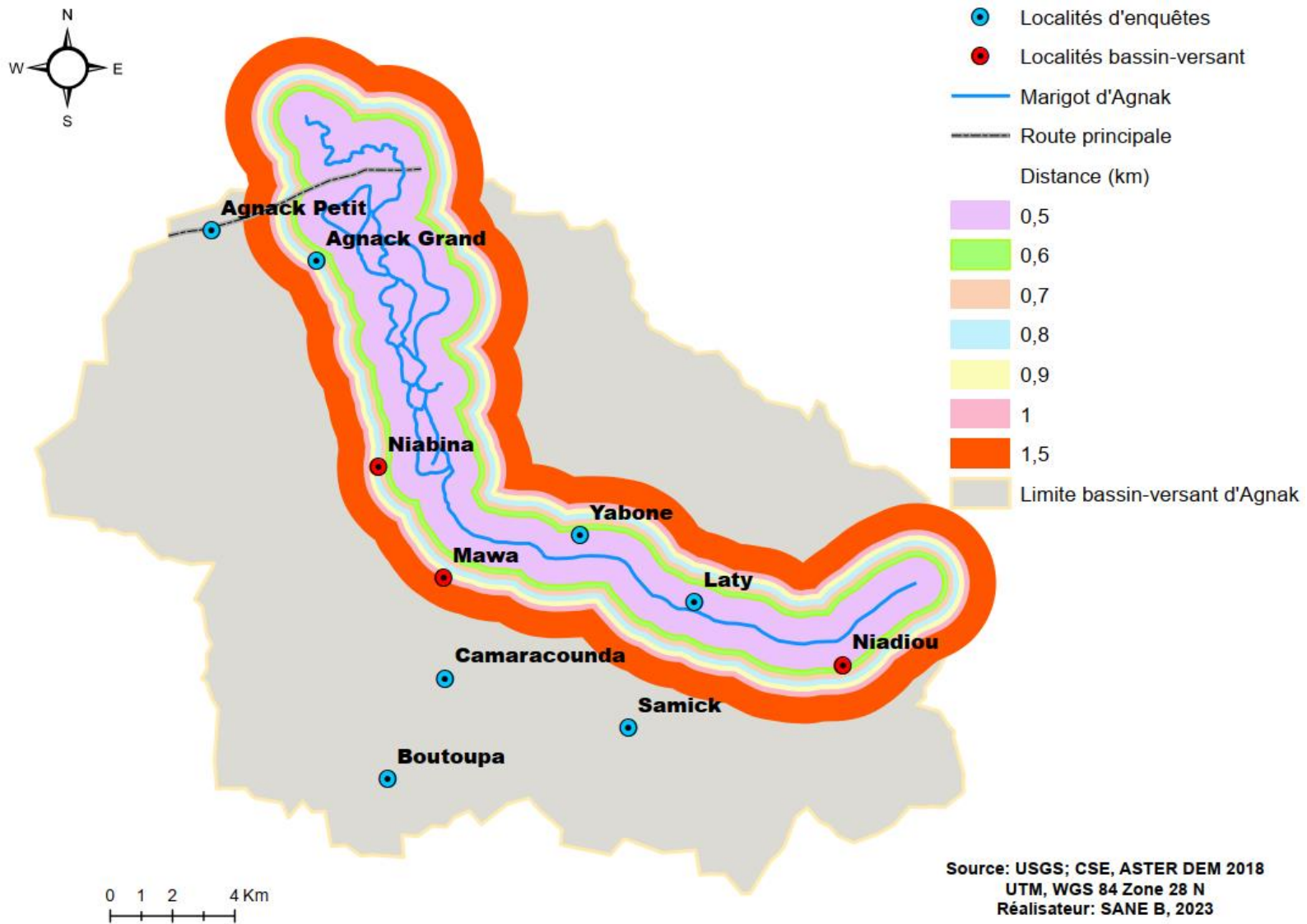
De par l'importance de ces vallées, très productives, de l'importance de la disponibilité de l'eau en quantité, de la coordination des actions de gestion de l'eau prioritaire pour cette communauté, 7 villages ont été retenus dans le bassin de Djibonker : *Katouré, Darsalam, Djibonker, Brin, Toubacouta, Bourofaye Bainouck et Mpack* (carte 1). Dans le bassin d'Agnak, 6 villages : *Agnak Grand, Agnak Petit, Camaracounda, Yabone, Laty, Samick* (carte 2).

La septième localité retenue dans le bassin de Djibonker (Brin), est rajoutée dans la liste du fait qu'elle se positionne à 1,5 km du cours principal du marigot de Djibonker. C'est un village de riziculteurs et de pêcheurs qui, du point de vue mutations socio-environnementales, a enregistré beaucoup d'impacts.

A Agnak, la plupart des terroirs retenus pour les enquêtes ont connu des périodes mouvementées dues au conflit en Casamance. Ce critère n'est pas le seul intégré dans le choix des zones.



Carte 1: Situation des localités d'enquêtes dans le bassin versant de Djibonker



Carte 2: Situation des localités d'enquêtes dans le bassin versant d'Agnak

Le critère de voisinage au réseau hydrographique indiqué sur les cartes 1 et 2 a aidé au choix des sites d'enquêtes socioéconomiques. Les villages et l'effectif de ménages à enquêter sont consignés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2: Récapitulatif des villages enquêtés

Villages	Nombre de ménages	Ménage/4	Communes	Bassin versant
Agnak Grand	83	20	Adéane	Agnak
Agnak Petit	221	55	Adéane	
Camaracounda	113	38	Boutoupa	
Boutoupa	122	30	Boutoupa	
Laty	58	14	Boutoupa	
Mawa	47	12	Boutoupa	
Samick	49	12	Boutoupa	
Yabone	62	15	Boutoupa	
Niabina	34	8	Boutoupa	
Mpack	179	44	Boutoupa	Djibonker
Darsalam	67	16	Nyassia	
Katoure I	14	3	Nyassia	
Toubacouta	41	10	Nyassia	
Bourofaye Bainouck	60	27	Nyassia	
Djibonker	127	31	Enampore	
Brin	102	25	Enampore	
Total		321		

Source : ANSD (2013) et traitement statistique, Sané B., 2021

I.3.2.2. L'unité d'observation et la marge choisie

Parmi les 1284 ménages que comptent les villages ciblés, 25 % ont été retenus pour l'enquête. L'échantillon final est donc constitué de 321 ménages enquêtés. L'objectif est de comprendre l'organisation des terroirs, d'identifier les activités en rapport avec l'eau, d'analyser les mutations socio-économiques et environnementales dans les deux bassins. Le questionnaire est structuré autour de plusieurs rubriques :

- informations socio-économiques et organisations des pratiques sociétales ;

- changement des unités paysagères et impacts socioéconomiques ;
- états des lieux de l'environnement des bassins et perceptions des populations sur le fonctionnement des marigots et disponibilité de l'eau à usage agricole ;
- gestion de l'eau, contraintes et stratégies de gestion communautaire de l'eau.

Les habitants des deux bassins ont été nos interlocuteurs durant toute la période de collecte de données. Les répondants ont été ciblés en fonction de leur profil et de leur vécu dans la zone.

En termes d'échantillonnage ou de nombre de populations témoins, la cible repose sur les objectifs de la recherche et de la spécificité de la thématique de recherche (relative au comportement hydrologique des bassins associé aux activités socio-économiques et à la dynamique des unités paysagères). Les enquêtes ont globalement porté sur des individus ayant un âge compris entre 30 et 65 ans. En effet, on visait des répondants susceptibles de nous fournir des références solides sur l'historique des terroirs cibles, les formes d'organisations agricoles et les modes de gestion de l'eau autour des vallées. Un focus a été mis sur la population autochtone, celle qui a au moins résidé dans la zone depuis les années 1990. Pour une meilleure analyse de la dynamique de l'occupation des sols dans chaque terroir villageois retenu, le « feedback » des personnes ressources pouvait lever l'équivoque sur certaines questions. Avec cette approche, il faut souligner que le pourcentage (effectif partiel) des personnes remplissant la fourchette d'âge établie n'était pas connu par faute de données socio-économiques fines de chaque village. Toutefois, au cours du déroulement des enquêtes, nous avons atteint 22,5 % du nombre total de ménages de l'ensemble des bassins, soit une fréquence absolue partielle de 167 ménages à Djibonker et 154 à Agnak. Rappeler que le ménage constitue l'unité de référence des personnes interrogées sur notre échantillon. Également, les données du recensement de 2013 (ANSD) ont servi de base de référence de l'échantillon. Par souci de précision et de représentativité des résultats d'enquêtes, nous avons choisi d'interroger le ¼ des ménages de chaque localité retenue dans les critères de départ (tableau 2). Ainsi, on s'est retrouvé avec 321 ménages pour tous les bassins réunis.

Le choix des personnes à enquêter dans chaque village a été facilité par la méthode de boule de neige. L'échantillonnage en boule de neige (Goodman, 1961) est une forme de plan d'échantillonnage par dépistage de liens où l'on demande aux individus faisant partie de l'échantillon initial d'identifier des connaissances auxquelles on demande d'identifier, à

leur tour, d'autres connaissances, et ainsi de suite pour un nombre à interroger bien connu au départ. Cette forme d'échantillonnage raisonnée a été appliquée récemment au Burkina-Faso dans le bassin-versant du Sourou par Karambiri (2017).

Cette forme d'échantillonnage a été appliquée dans cette étude du fait de la situation socio-politique qui sévit dans cette partie de la Casamance, frontalière avec la Guinée-Bissau. La plupart des sites visités sont en reconstruction et les populations se préoccupent le plus des porteurs de projets de développement que d'enquêteurs venus pour une simple collecte de données.

I.3.3. La démarche qualitative

La démarche qualitative est l'enquête de terrain prolongée où le chercheur produit lui-même ses données ; il a recours à des entretiens approfondis ou semi-directifs, à des observations ou encore à des études de cas (De Sardan, 1998). Dans l'élaboration de notre outil de collecte, nous avons insisté sur la formulation des questions d'enquêtes car le chercheur lui-même produit des éléments d'enquêtes de terrain pour mieux trouver des réponses à ces différentes interrogations. Cette approche inclusive nous a permis d'aborder le maximum d'acteurs à savoir les autorités territoriales, les leaders communautaires et les chefs de villages des terroirs cibles.

La stratégie utilisée pour mettre en œuvre les méthodes d'analyse est de respecter la situation d'incertitude de départ et de ne pas imposer une méthode qui force les résultats dans un sens ou dans un autre mais qui laisse émerger d'éventuelles surprises (Cibois, 2007). Il est important de laisser de nouvelles questions ou interrogations apparaître pendant le déroulement des entretiens ou des enquêtes. Cela pourrait susciter de nouvelles questions et apporterait des réponses à certaines de nos interrogations. Pour notre travail, nous avons préféré couvrir le maximum de terroirs villageois pour éviter de recevoir des réponses semblables. Comprendre les actions locales entreprises par la population pour une gestion collégiale de l'eau associée au fonctionnement hydrologique des bassins versants constitue l'un des objectifs spécifiques de l'étude.

I.3.4. Près-soumission des guides et questionnaires d'enquêtes

Plusieurs outils ont été élaborés dans ce travail en fonction des sous-thèmes ou sections retenus. Les profils des répondants attendus recommandaient à ce qu'on spécifie les questions de recherche. En ce sens, les fiches d'enquêtes portant sur les questions liées à

l'organisation des producteurs ont été adressées aux groupements de femmes et jeunes exploitants agricoles des vallées. Les autres fiches sont soumises aux populations classées dans la catégorie autochtone, propriétaires des vergers (anacardiens, manguiers, agrumes, etc.) dans l'idée de ressortir des informations sur la reconversion des terres destinées auparavant à la monoculture arachidière. Enfin, deux fiches différentes, adressées aux jeunes et femmes qui s'activent dans l'agriculture hors saison des pluies ont été élaborées.

Cette étude test a été conduite dans les villages de Baraf, Agnak-Petit, Camaracounda et Bourofaye Diola. Pour le premier essai, l'outil a été adressé à un jeune entrepreneur agricole à Baraf (S.D), une association de femmes à Camaracounda (Groupement des femmes de Camaracounda) et des exploitants agricoles à Bourofaye-Bainouck.

I.3.5. Déroulement des enquêtes socio-économiques et collecte de données

Un groupe constitué de doctorants (2), d'un étudiant titulaire de master en Sociologie (1), d'étudiants en master 2 géographie (2) et Sociologie (2) m'a soutenu pendant la mission de terrain. Les enquêtes ont duré 4 mois : novembre, décembre, janvier et février.

Première phase : la première mission de terrain s'est déroulée entre la deuxième semaine du mois de novembre et début décembre 2020. Les enquêtes ont été conduites dans les villages de *Yabone, Laty, Camaracounda* et *Samick*. La triangulation qui a été faite a permis d'abord, d'observer la situation dans les villages déplacés et/ou affectés par le conflit en Casamance. Ensuite, les activités socio-économiques de ces dernières étaient mises en avant. Comment s'organisent-elles pour collecter et gérer l'eau dans leurs activités respectives ? Obtiennent-elles suffisamment d'eau pour développer leurs activités agricoles ? Les villages d'*Agnak Petit* et *Agnak Grand* ont concerné la deuxième mission dans ce bassin.

Deuxième phase : la deuxième mission de terrain a été effectuée dans la zone de Djibonker. Les enquêtes ont été conduites dans les villages de *Brin, Darsalam, Katouré, Toubacouta, Mpack, Bourofaye Bainouck*. La même cible a été abordée à savoir : les autochtones et les migrants (exploitants agricoles). Durant cette phase, les femmes ont été les plus interviewées au vu de leur forte implication dans les activités agricoles. Des femmes ont été interrogées au niveau des fermes agricoles communautaires, à savoir celles de Bourofaye-Bainouck et Toubacouta.

I.4. Intérêt et finalité de l'étude

Cette étude entre dans le cadre d'un diagnostic de la problématique majeure liée aux changements globaux pouvant contribuer à une connaissance transversale du fonctionnement hydrologique des petits bassins ruraux. En effet, avec les impacts liés au déficit hydro-pluviométrique enregistré ces dernières décennies, une analyse plus profonde permettra d'apporter plus de solutions ou pistes de réflexion aux problèmes. En grande partie, les objectifs des études antérieures portant sur la dynamique de l'eau dans un bassin ou qui traitent globalement les questions hydrologiques, étaient plus axés sur les précipitations (formes, durées, intensités, distribution spatiale, etc.) contrairement à l'identification des relations qui peuvent être observées entre les phénomènes physiques et les activités des populations. Et pour faire une analyse complète ou exhaustive des écoulements dans un bassin versant, il faut intégrer ou faire appel à plusieurs éléments qui englobent l'hydrosystème. Il s'agit de l'écoulement à travers une analyse des apports d'eau externes, de la morphométrie du bassin versant, des types de sols, de l'évolution géologique, de la géomorphologie et des différents types d'occupation ou d'affection des sols. A travers cette étude, tous ces paramètres ont été conjugués afin de mieux comprendre le comportement des bassins versants, ses impacts environnementaux et socio-économiques, et les mutations qui s'y observent. Le bassin versant constitue l'entité idéale pour mieux étudier cette dynamique de l'eau. C'est une surface naturelle régie par des éléments physiques qui concourent à la compréhension de son fonctionnement.

Cette étude est une contribution comme toute production scientifique, à la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants. La spécificité de cette étude, est l'espace d'étude (échelle plus fine) que nous avons choisi pour expérimenter la dynamique des flux sédimentaire sur deux bassins ruraux, peu étudiés. Cette étude servira de support dans un but de fournir aux décideurs des connaissances plus solides dans le domaine de la monographie des petits marigots à écoulement saisonnier et sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants non jaugés et ses potentiels impacts.

I.5. Études du milieu et de sa situation socio-économique

Le travail a été réalisé sur les bassins de Djibonker et d'Agnak qui abritent plusieurs localités essentiellement rurales. Le bassin de Djibonker est contigu au fleuve Casamance par l'un des principaux bolongs, le Kamobeul (carte 3).

Le marigot d'Agnak, en amont du terroir de Sindon, se jette sur le fleuve Casamance (carte 3).

Les marigots de Djibonker et d'Agnak constituent des bras du fleuve Casamance, et se situent tous les deux sur la rive gauche du fleuve Casamance. Ces petits marigots inféodés au grand bassin de la Casamance n'ont pas plus ou moins fait l'objet d'un suivi hydrologique ponctuel. D'ailleurs, ce fait se matérialise par l'état lacunaire des données hydrologiques enregistrées au niveau de la station du Guidel (situé à moins de 10 km du bassin d'Agnak) et à 20 Km de Djibonker.

Les bassins dégagent deux types de paysages hétérogènes :

-Djibonker, un marigot influencé par l'intrusion de l'eau de mer du bolong de Kamobeul, très salé, est constitué de petits bras à écoulement saisonnier. Un faible couvert végétal (mangrove) jouxte les ramifications secondaires du cours principal. En avant-plan de ce couvert végétal se trouvent des matériaux détritiques issus du fonctionnement morphosédimentaire du bassin de la Casamance.

-Agnak, situé sur la route nationale 6, se distingue par son cours principal (long de 15,2 km) à écoulement pérenne et très ramifié. Autour de ce marigot, se développe une végétation faible de palétuviers, et se pratiquent des activités piscicoles en amont de l'exutoire jusqu'à la localité d'Adéane. Dans les terroirs d'Agnak Petit, Agnak Grand et Niabina, arrivent des pêcheurs des villages environnants et des autres localités du pays pour y assurer leurs prises de poissons. Sur ce bassin, on y observe des terroirs riches en production horticoles et piscicoles qui procurent opportunités et ressources aux communautés.

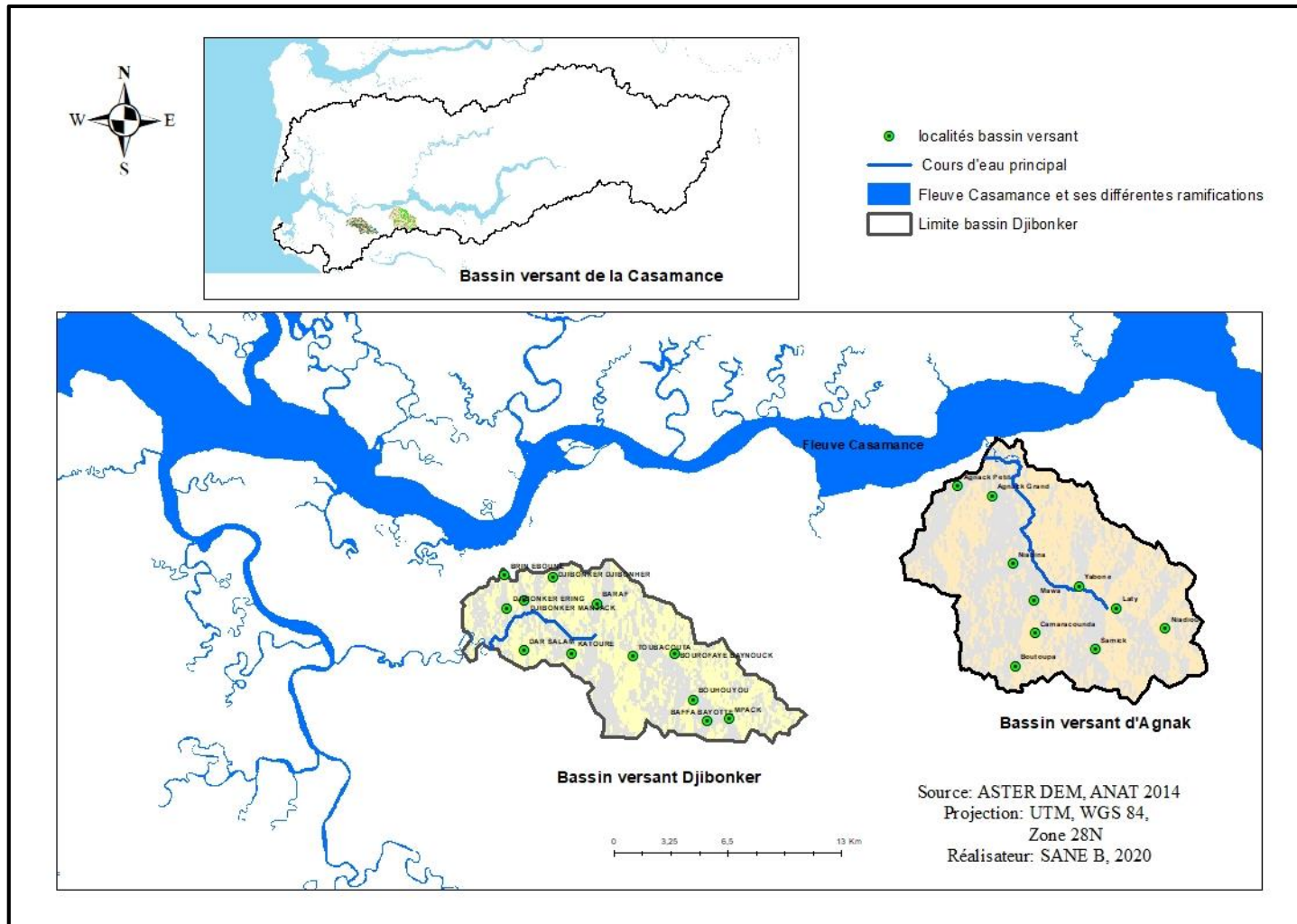
Dans le bassin de Djibonker, on y observe des terres moins affectées par l'intrusion de la langue salée. Ces terres affectées par le sel sont localisées à proximité de l'exutoire du bassin. Il s'agit des terroirs de Darsalam, Djibonker, Brin et Katouré. Pratiquement, la brise saline a récupéré une grande partie de leurs rizières et a entraîné une diminution du nombre de rizières en activité. Au niveau de la partie méridionale du bassin, se trouvent les terroirs de Toubacouta, Bourofaye-Bainouck, Mpack et Boffa-Bayotte, faiblement affectés par le sel. D'après le dernier recensement de la population générale de 2013, la population du bassin s'élève à 4005 habitants (tableau 3).

Par contre, le bassin d’Agnak, contigu au fleuve Casamance, est constitué de villages fortement touchés par l’avancée de la langue salée. Le bassin compte une population de 5007 habitants (ANSD, 2013).

Tableau 3: Localités polarisées par les bassins versants étudiés

Villages	Communes	Bassin versant
Agnak Grand	Adéane	Agnak 5007 habitants
Agnak Petit	Adéane	
Niabina	Boutoupa	
Camaracounda	Boutoupa	
Laty	Boutoupa	
Mawa	Boutoupa	
Samick	Boutoupa	
Yabone	Boutoupa	
Niadiou	Boutoupa	
Mpack	Boutoupa	
Boffa Bayotte	Nyassia	
Djibonker	Nyassia	
Bourofaye Bainouck	Nyassia	
Bouhouye	Nyassia	
Darsalam	Nyassia	
Katoure	Nyassia	
Toubacouta	Nyassia	
Brin	Enampore	

(Source : RGPFAE, 2013)



Carte 3: Situation géographique des bassins étudiés

I.5.1. Population et activités socioéconomiques

Les bassins versants étudiés abritent des territoires constitués d'éléments biophysiques et humains. Il s'agit ici d'identifier les activités socio-économiques, les différents groupes humains et les relations des communautés à la ressource eau. Dans les deux milieux étudiés, les activités socioéconomiques des communautés sont plus orientées vers l'agriculture pluviale. Les données du Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage (RGPHAE, 2013) révèlent que 71 % des ménages en milieu rural et 29 % en milieu urbain s'adonnent à cette activité sans y être seulement salariés. En outre, 6 % des ménages agricoles du Sénégal résident dans la région de Ziguinchor. La culture pluviale y est la plus pratiquée avec 66,85 % d'actifs (ANSD, 2017).

I.5.1.1. Évolution de la population des communes des bassins étudiés

La population des communes de Nyassia, Boutoupa Camaracounda, Niaguis, Enampore et Adéane a connu une croissance et décroissance de 1988 à nos jours. Les données officielles tirées des structures habilitées révèlent cette modification des données qui s'explique par plusieurs facteurs. L'évolution de la population desdites communes a connu une baisse considérable entre 1992 et 2003. Cette diminution coïncide avec le mouvement des populations affectées par le conflit en Casamance. Cette période a connu un flux de populations vers les pays voisins comme la Gambie et la Guinée-Bissau, et d'autres rejoignent leurs parents proches du Balantacounda, du Pakao, du Fogny et du Boulouf.

Entre 2003 et 2010, on note un retour progressif des populations, particulièrement dans la Commune de Boutoupa Camaracounda. Le nombre d'habitants de cette collectivité territoriale passe de 3 738 habitants à 5 149 habitants, soit une croissance de 14,11 % (fig. 1). Depuis, le retour presque définitif de la paix en Casamance, en particulier dans le front sud, ces terroirs continuent de recevoir une importante vague de population. Nous pouvons le constater à partir des chiffres de 2010, 2013, 2014 et 2015 (fig. 1), période durant laquelle les déplacés du conflit reviennent dans la zone ainsi que les nouveaux arrivants de la Guinée-Bissau.

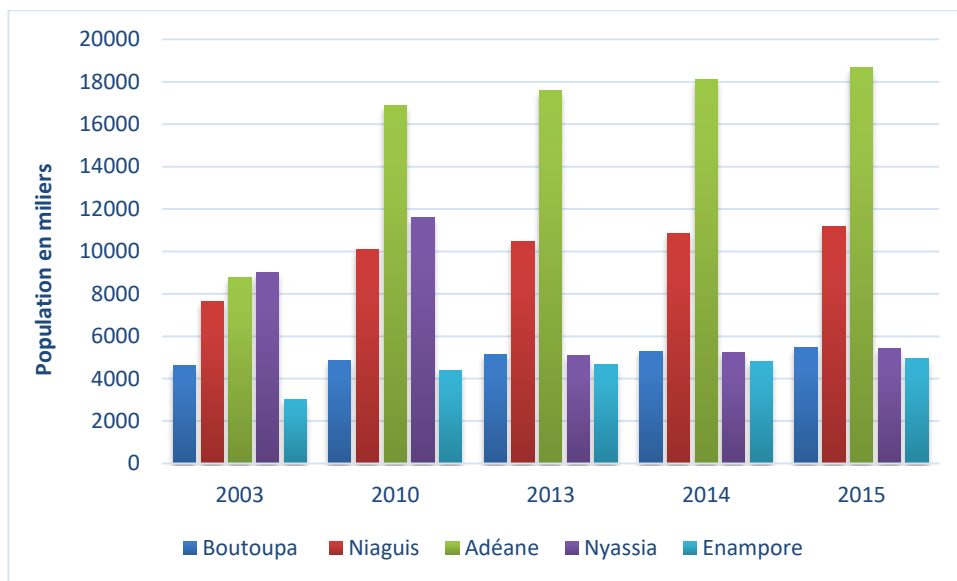
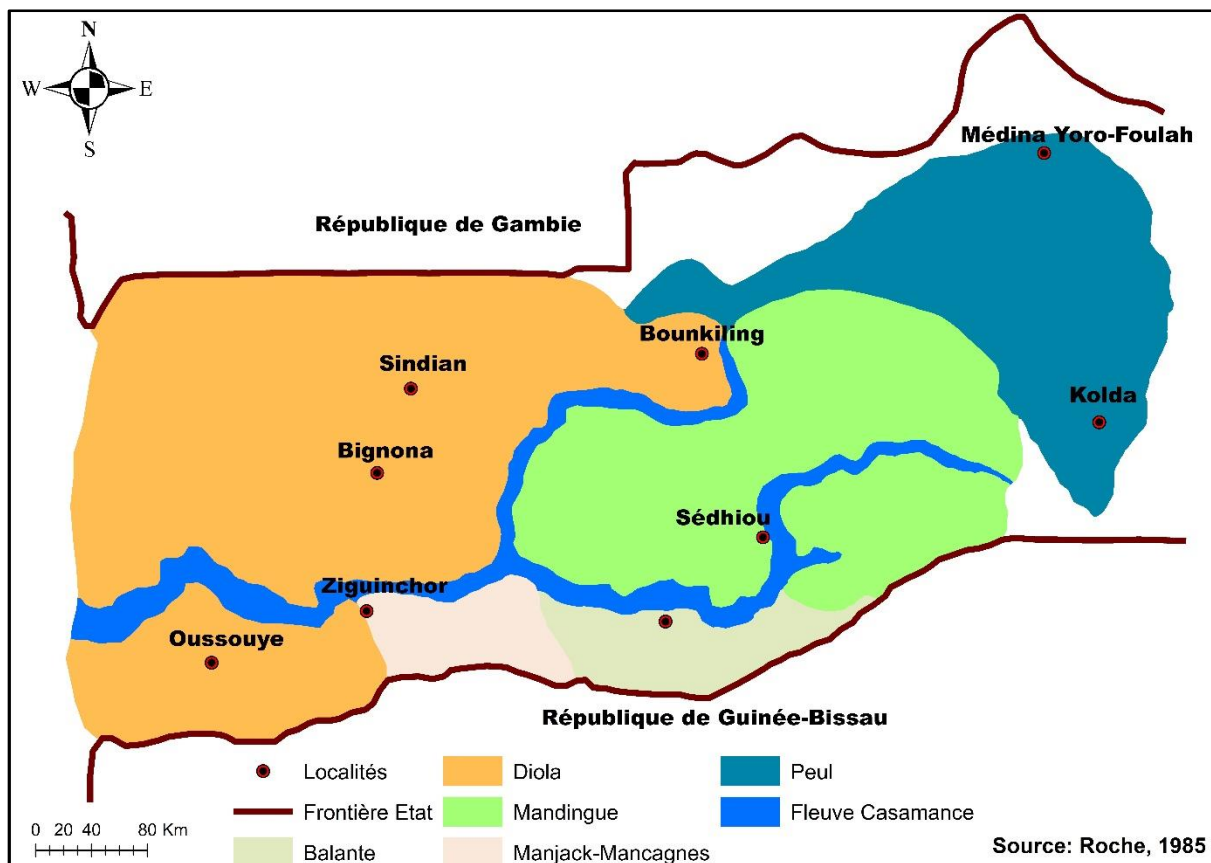


Figure 1: Evolution de la population des communes des bassins étudiés entre 2003 et 2015 (Source : ANSD, 2020)

I.5.1.2. Une diversité de groupes ethniques dans les deux bassins

La Casamance est un véritable creuset ethnique sénégalais. Géographiquement, les groupes diola sont répartis entre le littoral et l'axe Ziguinchor-Boukiling, les communautés Manjacks, Mancagnes, Baïnoucks, Balantes se retrouvent au sud du fleuve Casamance, entre Ziguinchor et Goudomp (carte 4). Les communautés mandingue sont connues à l'est du Soungrougrou et dans la région de Sédhiou (Moyenne-Casamance) et les communautés peulh en Haute-Casamance ou actuelle région de Kolda (Diémé, 2019).



Carte 4 : Répartition des différentes ethnies en Casamance

Présentement, cette même configuration est retrouvée dans les terroirs villageois de nos bassins d'étude. Au niveau du bassin de Djibonker, on note la présence de diverses communautés. Les résultats des enquêtes montrent une forte présence des Diolas (40,86 %) dans pratiquement l'ensemble des villages visités. Ils sont plus présents dans les villages de Mpack, Katouré, Darsalam, Djibonker, Brin et Toubacouta.

Majoritairement représentés dans ces six villages, les Diolas constituent une communauté symboliquement liée à sa culture et à sa tradition. Une tradition qui est purement rattachée à la culture du riz, et cela depuis des siècles. Les Mandingues sont aussi bien représentés dans la zone (20,23 %). La communauté Baïnouck est la troisième ethnie qui occupe la zone de Djibonker et d'Agnak (16,73 %). Ils habitent principalement dans les villages de Bourofaye-Baïnouck, Agnak Grand, Samick et Agnak-Petit. Cette population s'intéresse à la culture saisonnière, en l'occurrence, le sésame, les agrumes et l'anacarde. Elle s'active plus à la culture de plateau, plus rentable économiquement, que le riz dans les vallées selon une bonne partie des répondants rencontrés au cours des enquêtes.

Aujourd'hui, cette communauté est fortement présente dans le bassin d'Agnak, car elle symbolise ou reflète l'histoire des formes d'organisation des terroirs en retour de la commune de Boutoupa-Camaracounda.

D'autres groupes ethniques sont identifiés dans la zone, à savoir les Mandingues, les Balantes (7,78 %), les Manjacks (5,45 %) et 1,17 % de Mancagnes (fig.2). On trouve les Mandingues dans les terroirs de Camaracounda, Agnak-Petit et Mpack. Ils représentent avec les Balantes, la communauté originaire de la Guinée-Bissau et de la région de Sédhiou.

Globalement, on observe une diversité de groupes ethniques aux pratiques socioculturelles multiples cohabitant dans le même bassin versant.

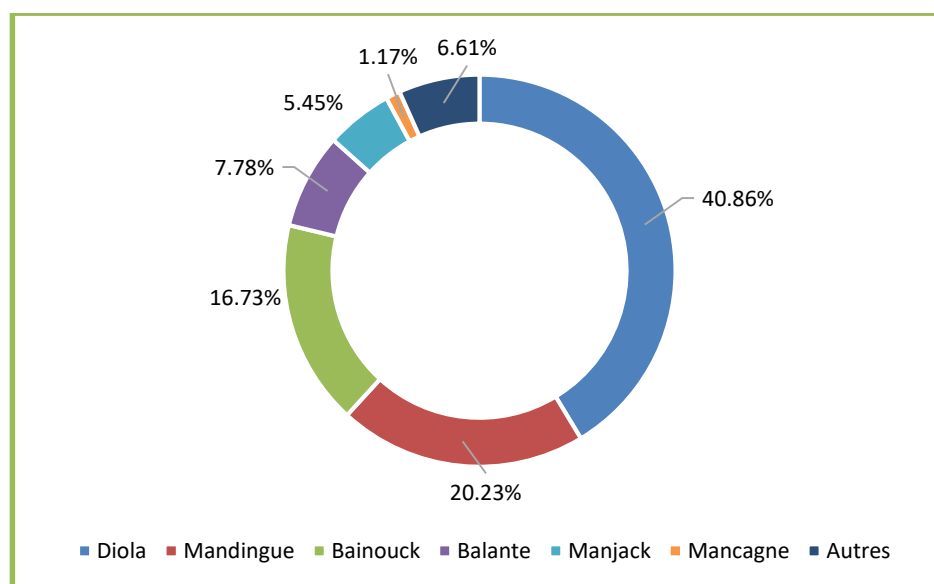


Figure 2 : Répartition ethnique des populations des villages enquêtés

(Source : Enquêtes, SANE B., 2020)

I.5.1.3. Des terroirs en reconstruction

L'instabilité liée au conflit qui sévit en Casamance a entraîné un important mouvement de population dans plusieurs terroirs villageois des deux zones de notre étude. Entre 1991 et 1998, des mouvements massifs de population vers la Guinée-Bissau, la Gambie et la ville de Ziguinchor ont été enregistrés dans les communes de Nyassia, Niaguis, Boutoupa-Camaracounda et Adéane (tableau 3). Dans la commune de Nyassia, les villages de Darsalam, Toubacouta et Katouré ont été complètement abandonnés par les populations

entre 1992 et 1998. La frange la plus importante s'était installée à Ziguinchor et le reste dans les villages de Djibonker, Brin et Nyassia.

Fortement touchées par le conflit armé, les communes de Camaracounda et de Nyassia sont dans une dynamique de reconstruction. Les déplacés du conflit regagnent progressivement leurs terroirs villageois d'origine, abandonnés pendant plus d'une décennie.

Dans le cadre de la relance des activités dans ces terroirs villageois, des partenaires au développement (ONG) et l'État procèdent à la mise en œuvre de projets et programmes de développement et de réinstallation de la population. Le CICR et le projet « une maison un toit » de l'ONG Shelter for life appuient en matériaux de construction (rôniers et tôles) les populations des villages de Laty, de Yabone, de Niadiou et de Samick.

C'est aussi une zone très affectée par le vol de bétail (boeufs et petits ruminants). Cette situation a motivé l'intervention du CICR en 2012 qui a procédé à la remise d'une chèvre à chaque famille déplacée du conflit armé dans la commune de Camaracounda.

Toujours dans le cadre de la relance des activités, le Projet Pôle de Développement de la Casamance (PPDC) a aménagé la vallée de Mpack en 2018 (plus de 1300 ha) pour accompagner les communautés à la relance de la riziculture et du maraîchage. A cet effet, quatre ouvrages de rétention et de régulation des eaux pluviales ont été installés dans les vallées de Toubacouta, Bourofaye-Bainouck, Mpack et Bofa-Bayotte (photo 1). A Yabone (bassin d'Agnak), une ferme communautaire de plus de 9 ha a été aménagée et un dispositif de goûte à goûte installé pour accompagner les femmes dans le développement de l'activité maraîchère. Aujourd'hui, cette ferme emploie 24 personnes dont 13 femmes actives. D'après la présidente de la ferme communautaire, 2 250 000 FCFA ont été obtenus dès la première année de production. Également, depuis 2012, la CARITAS appuie les agriculteurs en engrais bio et à l'aménagement de parcelles pilotes afin d'augmenter les rendements.

Tableau 4 : Chronologie du conflit

Observations	Années			
	1982	1991-1998	2000-2001	2007-2020
	Début du conflit et occupation de l'armée dans la zone	Mouvement massif des populations vers la Guinée-Bissau, la Gambie et la ville de Ziguinchor	Développement des initiatives de paix par les populations et des acteurs du conflit	Accalmie et retour progressif des populations déplacées et reconstructions des terroirs naguère abandonnés

(Source : Enquêtes, SANE.B., 2020)



Photo 1 : Ouvrage de rétention des eaux pluviales à Mpack (A) ; une vue de la ferme agricole aménagée par le PPDC à Bourofaye-Baïnouck (B)

(Source : SANE B., octobre, 2021).

I.5.2. Activités socioéconomiques des populations des bassins versants étudiés

Les principales activités socio-économiques de la région sont l'agriculture, la pêche et le tourisme. Selon les données de l'ANSD (2020), l'agriculture occupe le premier rang avec près de 80 % de la population active. Dans les localités enquêtées des bassins de Djibonker et d'Agnak, les populations interrogées s'intéressent principalement à l'agriculture, au commerce, à la pêche et à l'élevage.

Globalement, on rencontre des populations qui s'activent le plus dans l'agriculture (familiale, commerciale ou de rente). Elles représentent 91,6 % des personnes interrogées (fig. 3).

On y rencontre aussi ceux qui s'intéressent au petit commerce (marchés communautaires, marchés hebdomadaires (*loumos*) et marchés de la ville de Ziguinchor (3,1 %). Les répondants qui interviennent dans le secteur du commerce sont composés d'exploitants de périmètres maraîchers et de rizières de bas-fonds.

Dans la zone de Camaracounda, la population se mobilise le plus à l'agriculture familiale. Les pratiques agricoles sont dominées par les cultures de rente (arboriculture et maraîchage). La population qui s'adonne à la pêche représente 2,8 % (fig. 3).

Dans la configuration des zones d'études, les terroirs de Laty, de Yabone, de Niadiou et Samick regroupent le plus d'actifs dans l'agriculture.

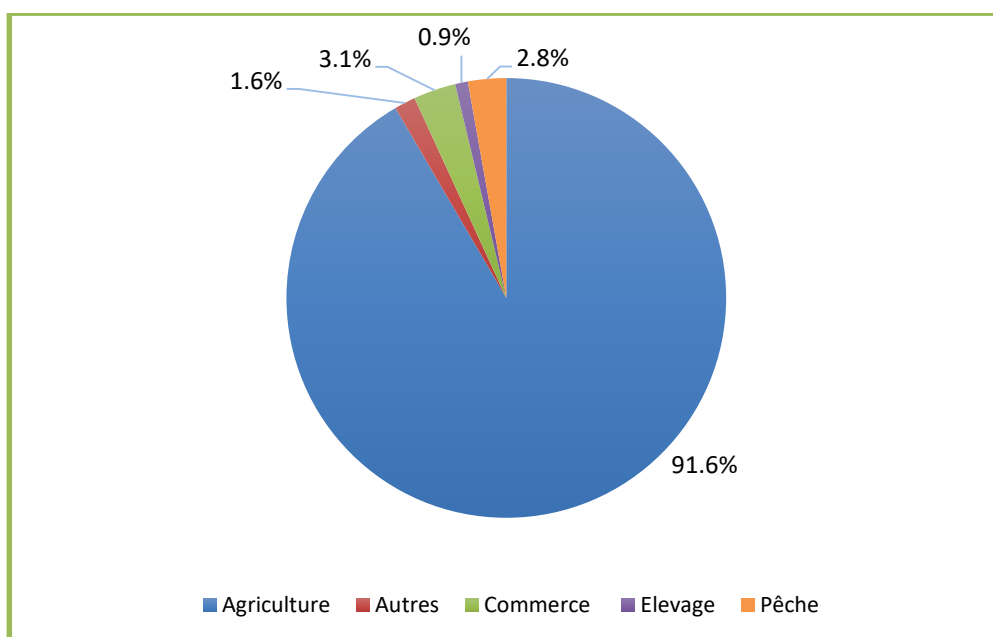


Figure 3 : Activités principales des ménages dans les bassins étudiés

I.5.2.1. Les principales pratiques agricoles dans les bassins étudiés

« On ne peut penser environnement en dehors de l'action des sociétés qui occupent un espace, le transforment, le gèrent » (Rossi *et al*, 1998). L'eau constitue une ressource indispensable au développement des activités socio-économiques des populations, surtout en milieu rurale. Dans cette zone, l'agriculture sous pluie constitue la principale activité qui mobilise le plus d'actifs. Les spéculations développées dans la zone sont le riz, l'arachide et les cultures maraîchères (*bissap*, gombo, piment, patate, etc.). On y note aussi des pratiques agricoles en saison sèche avec le maraîchage comme principale activité.

I.5.2.1.1. Les pratiques agricoles en saison des pluies

Les pratiques agricoles adoptées par la population en saison de pluies sont constituées principalement des cultures d'arachide, de riz, de maïs et de la pastèque. On note l'adoption de la culture de riz, de l'arachide et du maïs comme types de spéculation les plus pratiquées dans la zone. 45,48 % (fig.4) des populations enquêtées adoptent ces types de cultures en saison de pluies.

Il est constaté également que trois (3) types de spéculations caractérisent l'agriculture pluviale des deux bassins : le riz, l'arachide et la pastèque. La seconde spéculation est basée sur des jachères très courtes avec des rotations pastèque-arachide-maïs. En dehors de ces cultures, les populations s'intéressent au mil, au manioc et aux cultures maraîchères. Pailleurs, l'arboriculture demeure la pratique agricole la plus développée dans les terroirs des bassins-versants d'étude.

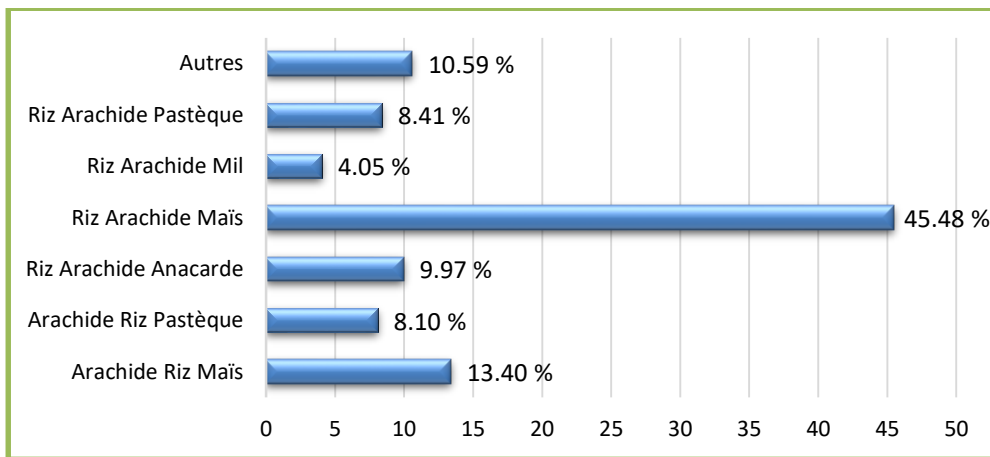


Figure 4 : Différentes cultures développées dans les bassins étudiés selon la population interrogée

(Source : Enquêtes, SANE B., 2020)



Photo 2 : (A) Riz récolté et en bottes en aval de l'ouvrage de régulation de Binako (janvier, 2020) ; (B) Femmes en pleine activité de repiquage de riz dans la vallée de Camaracounda (octobre, 2021)

La filière riz occupe une importance sociale dans la zone. Étant en pays majoritairement composé de Diolas, le riz est la principale culture d'autoconsommation mais également destinée aux cérémonies culturelles et cultuelles.

La riziculture de bas-fonds demeure toujours l'une des premières occupations des femmes et des hommes en milieu rural, surtout en Basse-Casamance.



En dépit des tendances climatiques actuelles associées à la réduction de surfaces rizicoles et à la baisse des rendements, les autochtones continuent à s'intéresser à la riziculture de bas-fonds. Une situation que l'on note dans la vallée de Mpack partagée par les villages de Mpack, Toubacouta et Bourofaye-Bainouck. Cette photo

montre la mobilisation et le dynamisme des femmes autour des activités rizicoles dans la vallée de Mpack.

Photo 3 : Récolte de riz par les femmes à Toubacouta dans la vallée de Mpack (janvier, 2022)

Pour une bonne gestion du travail, les femmes s'organisent en associations ou en groupements durant toute la campagne rizicole. Elles s'organisent également en familles pour la surveillance du riz en période de pré-récolte. Également, tout autour de ces parcelles rizicoles, s'imbriquent des systèmes agricoles ou pratiques culturelles diverses. On a identifié des femmes qui préfèrent cultiver le riz qui dure 2 mois 15 jours pour des questions de manque de temps en début de saison de pluies. D'autres, par contre, (60 %) préfèrent consacrer leur temps dans le secteur maraîcher (fig.5), plus rentable économiquement.

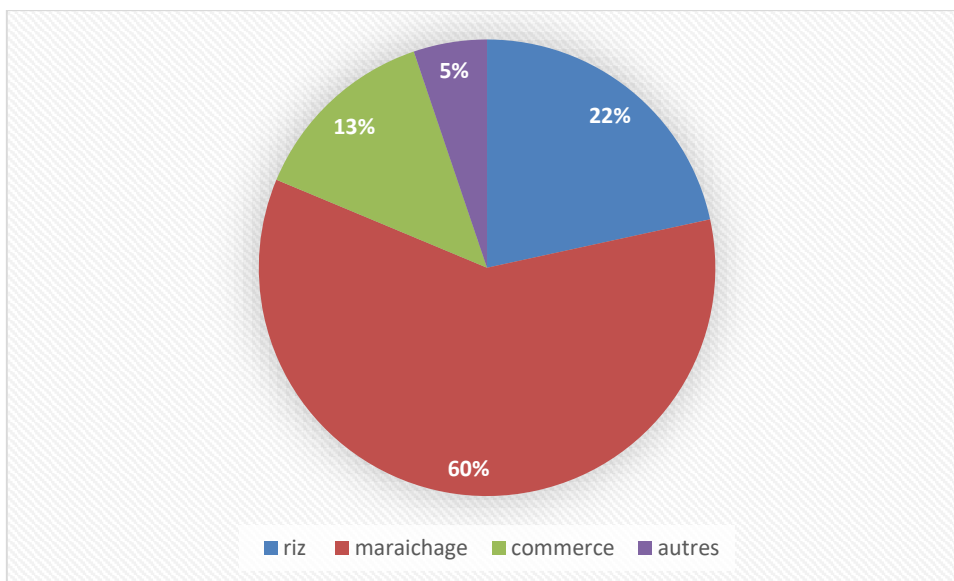


Figure 5 : Diversité des activités socioéconomiques dans les bassins d'étude

I.5.2.1.2. Les pratiques agricoles hors saison des pluies

La proximité de la rivière offre aux agriculteurs une ressource permanente et relativement peu coûteuse pour l'irrigation (Gatien *et al.*,2011). Connaissant ces fortes potentialités qu'offrent en particulier les vallées, les populations des bassins d'étude s'adonnent en grande partie aux activités maraîchères. Ces activités sont exercées autour de cultures dénommées « cultures de décrues ou irriguées » (37,7 %), fortement développées dans les villages de Mpack, Bourofaye-Bainouck, Toubacouta, Boutoupa et Camaracounda. Très développée en saison sèche, l'activité maraîchère s'inscrit dans une forme de gestion de l'eau. Les producteurs maraîchers colonisent les terres rizicoles et une partie des petites fermes familiales. Dans certains cas, des GPF, GIE et associations de producteurs maraîchers sont mis en place et dirigés en général par des femmes. D'autres pratiques sont développées dans les bassins d'étude. Il s'agit de palmeraie et la foresterie pratiquée respectivement par 0,8 % et 0,3 % des populations des bassins d'étude.

I.5.2.2. Les activités de pêche et d'élevage

Les activités de pêche et d'élevage sont peu pratiquées par la population des bassins d'étude. La pêche pratiquée dans les bassins d'étude est une pêche de subsistance. Elle est pratiquée au niveau des villages de Djibonker, Brin et Darsalam où quelques pêcheurs ont été rencontrés pendant nos enquêtes de terrain dont certains s'y occupent uniquement pour les besoins de la consommation domestique. Comme indiqué sur la photo 4-B, on a trouvé

un habitant de Darsalam faisant une activité de pêche au niveau du marigot de Djibonker, en amont de Binako.

Dans le bassin d'Agnak, elle a lieu dans les villages d'Agnak-petit et d'Agnak-Grand.

L'élevage est également peu développé dans les bassins d'étude. Les petits ruminants (caprins, ovins, porcins) en nombre infime sont les plus identifiées dans les maisons. Les bovins ont presque tous disparu, ce qui fait qu'au plan agricole, on ne trouve plus d'animaux de trait pour tracter le matériel agricole. Nous en avons identifié quelques têtes de bœufs à Mpack et Bourofaye-Baïnouck (bassin versant de Djibonker). Dans le bassin versant d'Agnak, précisément à Camaracounda où le bétail s'abreuve autour du marigot (photo 4-A) et des terres de cultures de plateau, quelques bœufs y ont été identifiés. Globalement, nous en avons dénombré pendant nos enquêtes 2,8 % d'actifs dans ce secteur, un effectif considéré relativement faible. Cette faible proportion s'explique par le phénomène de vol de bétail (bœufs, chèvres et moutons) que subit cette communauté.



Photo 4: (A) Zone de pâturage de bœufs dans la vallée de Camaracounda (janvier, 2022) et (B) pêcheur artisan à Binako (octobre, 2022)

Conclusion du chapitre I :

En somme, nous retenons de ce chapitre, que plusieurs études ont été menées sur les questions de la ressource en eau et la gouvernance dans un contexte de variabilité hydroclimatique. Dans le bassin versant de la Casamance, quelques études ont été menées sur la quantification des précipitations et impacts dont un focus relativement faible sur les mutations socioéconomiques et environnementales.

Les concepts utilisés dans cette étude ont été définis pour une meilleure compréhension des différentes parties de cette thèse. Une approche systémique adoptée dans la méthodologie de

collecte des données socioéconomiques dans les bassins étudiés a été abordée. Elle est confortée par le contexte politico-militaire que les villages d'enquêtes ont subi.

Ces réalités historiques et politiques n'ont pas considérablement affecté le développement d'activités socio-économiques dans les bassins d'études. Quelques activités inhérentes à l'eau comme l'agriculture et la pêche artisanale ont été identifiées à travers les travaux de terrain. Ces caractéristiques socioéconomiques ne peuvent être étudiées sans pour autant aborder les éléments physiques, qui sont indispensables dans la compréhension du fonctionnement du milieu d'étude.

CHAPITRE II : MORPHOMÉTRIE, HYDRO-GÉOLOGIE, MORPHO-PÉDOLOGIE ET FORMATIONS VÉGÉTALES DES BASSINS D'ÉTUDE

Le diagnostic physico-géographique, première étape de la connaissance des bassins versants, permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans le processus de l'écoulement superficiel : facteurs orographiques, morphométriques, lithologiques, climatiques et biogéographiques (Kamila et Bouanani, 2016).

L'interaction de tous ces paramètres est déterminante dans l'étude du comportement hydrologique des bassins versants. L'analyse de ces différents indicateurs morphométriques permet de mieux apprécier les éléments qui contribuent au bon fonctionnement des bassins versants. C'est dans ce sens que Bauling (1959) affirme que la détermination des caractéristiques physiographiques est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant (lame d'eau précipitée, débits, bilan, etc.).

Ce chapitre porte d'abord sur la délimitation de nos différents bassins versants. Il s'ensuit la détermination des principales variables morphométriques, le calcul et l'analyse de corrélation (ACP) entre les variables des deux bassins ainsi que la déduction de leur rapport avec leur fonctionnement hydrologique. Enfin, ce chapitre se termine par une analyse des éléments qui concourent à l'étude du comportement des bassins versants, à savoir, les éléments de la pédo-géologie, les caractéristiques de la végétation et celles hydro-climatiques (pluviométrie, température et variable hydrologique).

I.1. Les éléments morpho-structuraux des bassins de Djibonker et d'Agnak

Pour la compréhension du dynamisme d'une rivière, la connaissance des caractéristiques morphométriques est éminemment importante. L'analyse morphométrique est une démarche importante pour la hiérarchisation des bassins versants, même sans tenir compte de la carte des sols (Faye, 2014). La réponse du bassin versant à une sollicitation des précipitations est influencée par diverses caractéristiques morphologiques, particulièrement sa surface, sa forme, son élévation, sa pente et son orientation (Djoukbala, 2019). Une détermination des caractéristiques physiques permet de mieux comprendre la dynamique de l'eau et les différents processus. Ce sont des paramètres complexes dont la détermination facilite sans aucune mesure la connaissance de la nature des bassins versants.

II.1.1. Données, matériels et méthodes utilisés

Un modèle numérique de terrain est une représentation numérique d'une région donnée par un champ d'altitude. Cette représentation peut être, soit d'un semis de points caractéristiques de la région, soit sous forme d'une grille régulière à mailles carrées connues sous le nom de représentation « Raster » (Derouille, 1994). Cette technique nous a permis de calculer en même temps la surface et le périmètre du bassin. L'intérêt d'un MNT est de limiter le bassin d'étude et l'extraction automatique des paramètres caractérisant le relief.

A l'aide de ces outils de la géomatique, nous avons pu délimiter nos deux bassins. Etant donné que les unités d'occupation des sols et le phénomène de remontée des eaux ou grandes crues peuvent avoir une influence sur la limite réelle des bassins versants.

Les marigots des bassins de Djibonker et d'Agnak fonctionnent comme des affluents et défluent en même temps, c'est pourquoi, les délimiter à leur exutoire naturel conduirait à surestimer leurs écoulements.

Les paramètres morphométriques des bassins sont constitués de la superficie, du périmètre, de la longueur et largeur, du coefficient de compacité, de l'altitude ou la dénivelée, de la pente moyenne, de l'indice global, de l'indice de Roche et de la dénivelée spécifique. Ces différents éléments déterminent la nature du bassin, sa forme, et influencent son fonctionnement. Ces paramètres sont obtenus à partir du MNT.

II.1.2. Source de données utilisées

Le site américain de la NSA (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) constitue une source de données de haute résolution, gratuites et accessibles au public. Sur cette plateforme, on trouve des images Tiff (GDEM) à toutes les échelles et à différentes dates.

Partie intégrante du Programme Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), GDEM (Global Digital Elevation Model) ASTER est un modèle Numérique de Terrain (MNT) qui couvre le monde entier, entre 83°Nord et 83°Sud (Djoukba, 2019). Le modèle traité dans ce travail d'une résolution de 30m et de la projection WGS84 est extrait de ce site. Ci-dessous les différentes variables morphométriques (tableau 5) qui sont obtenues à partir du MNT.

Tableau 5 : Variables morphométriques calculées

Bassin versant	Superficie	Périmètre	KG	Longueur	Largeur	H5%	H95%	Dénivelée	Ig	Déniv Spécifique
	Km ²	Km		Km	Km	m	m	m	m/km	
Djibonker	107,8	60,3	1,62	22,8	7,2	42	8,5	33,5	1,46	15,158
Agnak	115,8	51,7	1,34	16,7	9,0	41	2,5	38,5	2,30	24,750

II.1.3. Hypsométrie des bassins versants

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin versant et représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude (Laabidi *et al.*, 2016). La forme de la courbe hypsométrique est caractéristique de l'état de maturité du relief (jeune, en équilibre et vieux) ainsi que sa capacité érosive (Musy, 2005 et Laabidi, 2016). D'après Strahler (1952), l'allure de la courbe hypsométrique caractérise le cycle d'érosion du relief actuel étudié (fig. 6). Les courbes hypsométriques indiquent des variations du relief sur le périmètre des bassins versants étudiés.

On observe des altitudes faibles sur une superficie de plus de 80 % de la surface totale du bassin (fig.6). Les irrégularités de la topographie sont plus observées sur le bassin d'Agnak. Par conséquent, les deux bassins sont de natures matures. Les niveaux les plus faibles sont observés sur le versant ouest du bassin d'Agnak (Samick, Niabina et le plateau de Bissine). Sur ce plateau, on note d'importantes irrégularités du relief indiquées par des altitudes globalement faibles.

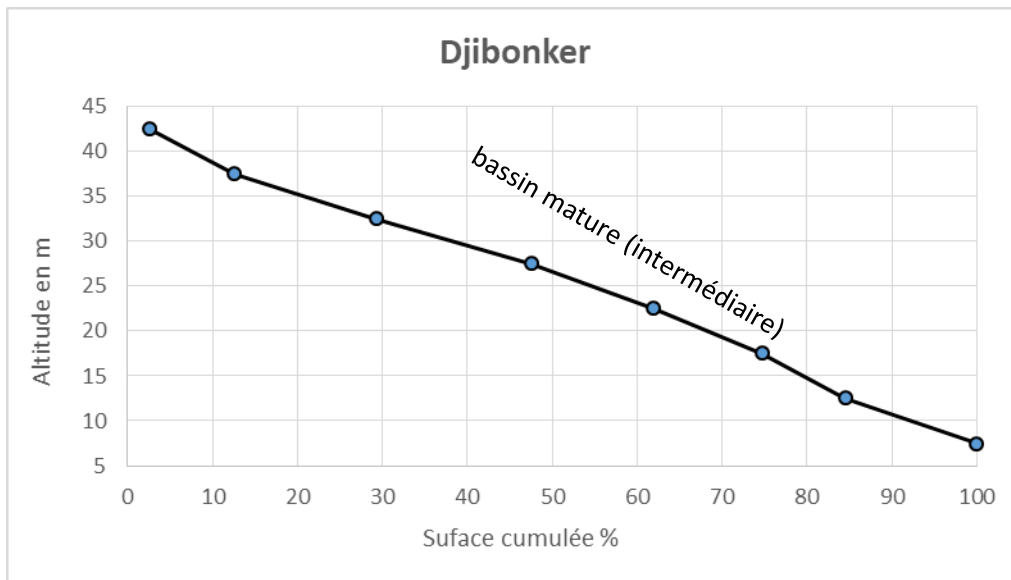
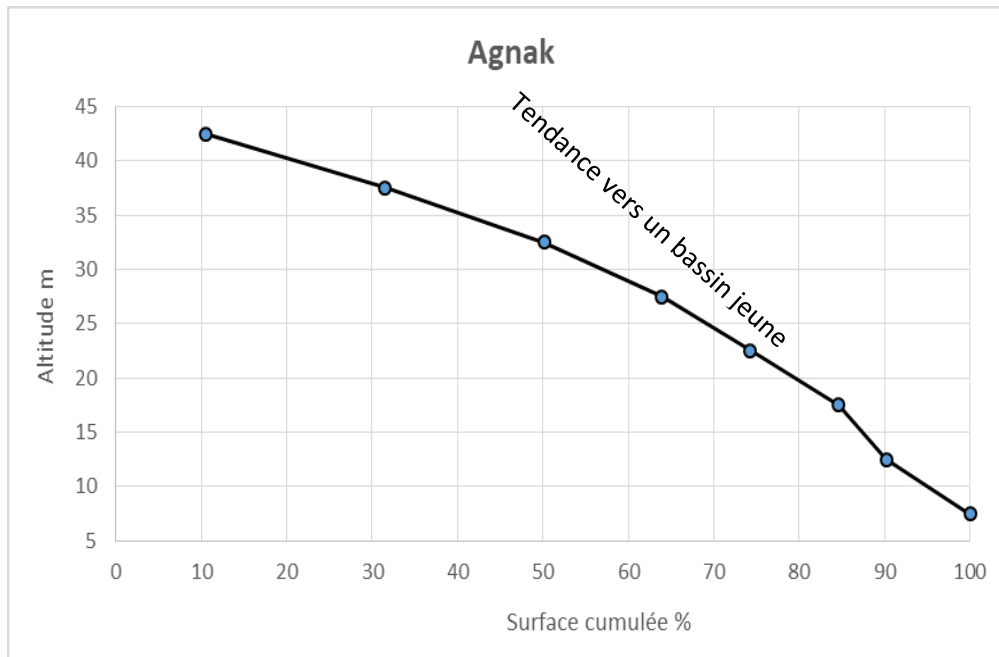


Figure 6: Courbes hypsométriques des bassins versants de Djibonker et d’Agnak

II.1.4. Altitudes moyennes des bassins

Les altitudes des bassins versants sont calculées sur la base des variables morphométriques et des données de mesure. Les altitudes sont comprises entre 7 et 45 m sur l’ensemble des bassins d’étude (tableau 6).

Tableau 6 : Altitudes médianes, surfaces partielles et altitudes moyennes des bassins versants étudiés

Agnak			
Altitudes	Him	Si Km²	(Si xHi/sBV)
5-10	7,5	16,64	1,16
10-15	12,5	10,61	1,23
15-20	17,5	13,75	2,23
20-25	22,5	15,55	3,25
25-30	27,5	19,66	5,01
30-35	20	17,98	3,34
35-40	37,5	10,73	3,73
40-45	42,5	2,81	1,11
-		Hmoy=	21,06

II.1.5. Surfaces et périmètres

Les surfaces des bassins de Djibonker et d'Agnak sont respectivement de 107,8 km² et 115,8 km². La surface et le périmètre sont deux paramètres extrêmement importants dans l'étude d'un bassin versant. Ces deux paramètres ont permis de calculer les autres caractéristiques morphométriques représentées dans le tableau 6 ci-dessus.

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits sont en partie reliés à sa surface avec notamment ses différentes composantes physiques. Théoriquement, plus la surface de collecte est importante plus les débits sont importants.

Cependant, le débit spécifique évolue de façon inverse à l'augmentation de la surface. Contrairement à la surface, le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés (Faye, 2014).

II.1.6. Indice de forme (Kc), longueur et largeur

En hydrologie, caractériser la nature et la forme du bassin versant est d'une grande importance, car elles permettent de mieux comprendre son comportement hydrologique. C'est un indicateur morphométrique qui détermine le fonctionnement du bassin face à un phénomène hydrologique (écoulement dû à une forte précipitation, grande crue, etc.). En

plus de ce rôle, la forme du bassin versant peut déterminer l'évolution des écosystèmes et de la dynamique de l'espace qu'occupe son aire d'influence. D'après Morel (1999), l'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de GRAVELIUS (1914) qui est le rapport de périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. On l'obtient à partir de la formule suivante :

$$K_G = (0,28 \times P) \div \sqrt{A}$$

Avec :

P= 60,3 km (Djibonker) et 51,7 km (Agnak) ;

A=107,8 (Djibonker) et 115,8 km² (Agnak).

En respectant les critères de formes des bassins versants et la classification de l'ORSTOM, c'est-à-dire un indice K_G proche de 1, nous avons un bassin de forme circulaire. Par contre, une fois la valeur de $K_G > 1$, le bassin est de forme rectangulaire. Il est dit allongé. Le résultat obtenu après calcul de nos différents bassins est égal à 1,62, bassin allongé (Djibonker) et 1,34, bassin intermédiaire (Agnak). Tous nos deux bassins ont des formes plus ou moins allongées.

En effet, la forme d'un bassin versant influence le parcours de l'eau dans toutes ses différentes sections. Cela a effectivement des impacts sur l'écoulement des bassins, notamment sur la réponse de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, cela en raison du temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus important. C'est d'ailleurs dans ce sens que Debrouse et Seinandre (2008) disent que : « *la concentration des eaux dans un bassin versant long et étroit sera assez lent. En revanche, un bassin petit circulaire générera une crue très rapide* ».

Nous sommes en mesure de voir comment se comportent ces bassins avec les données hydrométriques couplées aux données morphométriques des bassins. Il faut préciser qu'il y a beaucoup d'éléments ou facteurs qui concourent à la modification des caractéristiques hydrologiques des bassins. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer les activités socio-économiques mais aussi la dynamique temporelle actuelle liée au phénomène du changement climatique. Dans une dynamique de reconversion des territoires, plusieurs impacts peuvent subsister ou en découler.

Le rectangle équivalent est défini comme le rectangle de la longueur L et de largeur l qui a le même périmètre que le bassin, soit à l'aide de $P=2 \times (L+l)$ et $A=L \times l$ (Laborde, 2000). C'est une transformation purement géométrique du bassin versant en un rectangle de dimensions L et l. Ce dernier permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement.

Également, on peut calculer le rectangle équivalent à partir du coefficient de compacité (**Kc**), où $2(L+l) = P$ et $L \times l = A$ avec la formule suivante :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right]$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right]$$

Après traitement, nous avons obtenu les résultats consignés dans le tableau 7. Nous avons dans le tableau 7 les statistiques des paramètres morphométriques déterminés des bassins versants étudiés. La longueur du rectangle équivalent du bassin de Djibonker (25,81 km) est plus élevée que celui d'Agnak (19,94 km).

Tableau 7: Paramètres morphométriques des bassins d'étude

BV/Paramètres	Longueur (km)	Largeur (km)	Surface (km ²)	Périmètre (km)	KC
Agnak	19,94	5,79	115,8	51,7	1,34
Djibonker	25,81	4,20	107,8	60,3	1,62

II.1.7. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique est une autre caractéristique de la forme du bassin versant. Elle est calculée à partir de la dénivelée (H5 %-H95 %). Ce calcul permet d'avoir un aperçu de la configuration des caractères du bassin versant. Elle dérive de la pente globale :

$$Ds = I_g \sqrt{A}. \quad Ds = \mathbf{24,74} \text{ (Agnak) et } \mathbf{15,15} \text{ (Djibonker)}$$

La classification de l'ORSTOM (1964) donne des seuils pour ces différents indices (Laborde, 2009). Selon cette classification ces bassins ont des reliefs faibles à assez faibles.

Tableau 8 : Classification des différents types de relief selon l'ORSTOM

R1	Relief très faible	$D_s < 10$
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25$
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100$
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500$
R7	Relief très fort	$500 < D_s$

II.2. Évolution du relief des bassins versant de Djibonker et Agnak

Dans ce travail, nous utilisons le complément "Swath profiler" pour délimiter les profils des bassins versants. L'outil est installé dans Arcgis sous forme d'extension au niveau de l'outil "Editor". De suite, un Shapefile qui découpera le bassin en deux transects A et B, dénommé "profil top" est créé dans Arc catalogue. Le complément "Swath Profiler" permet d'analyser la topographie au sein d'une bande "Strip width" en représentant les élévations moyennes, minimales et maximales, le premier et le troisième quartile, le relief local et l'hypsométrie. L'outil facilite l'environnement de travail avec ses sorties graphiques faciles pour comprendre la physiographie des bassins.

Pour mieux déterminer les caractéristiques topographiques des deux sites, nous avons utilisé la méthode ou la technique de la délimitation de plusieurs transects du relief. La méthode de "Swath profiler" ou profil d'andain ordinaire deux compléments ou extensions d'arcgis qui permet d'analyser les élévations de surface et la description quantitative de la topographie des rivières en analysant d'autres caractéristiques morphologiques telles que la pente ou le relief local (Hergaten, Robl, Stuwe, 2013 ; Perez-pena *et al.*, 2017). Nous avons couplé cette méthode avec l'analyse de l'évolution du relief des bassins versants.

L'étude du relief et ses différentes composantes sont éminemment importantes puisque la dynamique de l'écoulement des eaux dans un bassin est contiguë à la forme du relief c'est-à-dire sa pente, son degré d'inclinaison, etc. Il est souvent admis que la réponse hydrologique des bassins dépend de l'influence des facteurs d'écoulement (Sow, 2007 ; Faye, 2014 ; Baba Hamad et Bouanani, 2016), dont les facteurs stables liés à la forme du bassin et de ses divers paysages (géologie, sols, végétation, relief). Également, le type ou la forme de la pente donne

une meilleure indication sur la durée du ruissellement ou de l'écoulement des eaux. Le relief est sans doute le facteur qui traduit le mieux la partition du bassin entre le cours supérieur aux hautes terres et le cours moyen au relief moyen (Faye, 2018).

Les analyses basées sur les profils topographiques sont utiles pour explorer la réponse du paysage à court et à long terme à l'activité tectonique et au changement climatique (Perez-pena *et al.*, 2017). Plus la pente est forte, plus la vitesse de l'écoulement devient relativement intense, et en même temps des sédiments sont sapés par les éléments liquides. L'appréhension du relief peut être faite à l'aide de l'indice global de pente par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

D : dénivelée correspond à la différence entre l'altitude maximale et minimale obtenue par la courbe hypsométrique (H5 %-H95 %)

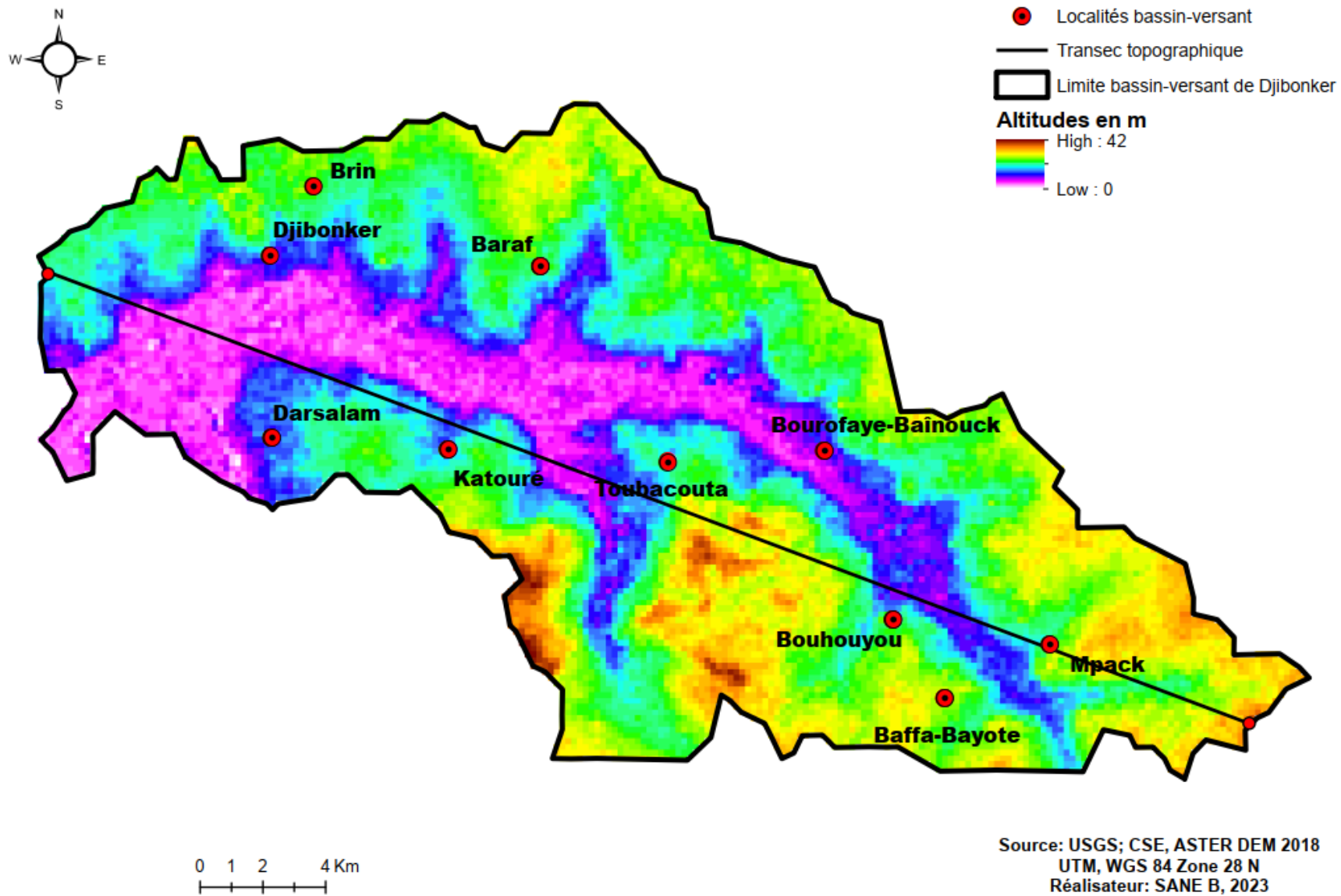
L : longueur du rectangle équivalent en (m).

Après calcul, nous avons obtenu les résultats suivants : 1,46 m/km (bassin de Djibonker) et 2,30m/km (bassin d'Agnak). L'analyse des résultats laisse apparaître des pentes relativement faibles dans l'ensemble des deux bassins. Selon la classification de l'ORSTOM, un relief est dit fort si son indice de pente est compris entre 20 m/km et 50 m/km. Ce qui laisse croire par ailleurs à une vitesse faible de l'écoulement au niveau des bassins de Djibonker et d'Agnak. Cette faiblesse des pentes explique l'invasion profonde de la mer à l'intérieur du bassin de la Casamance (Dacosta, 1989). D'ailleurs c'est ce qui fait la spécificité du marigot d'Agnak, à l'image du fleuve Casamance.

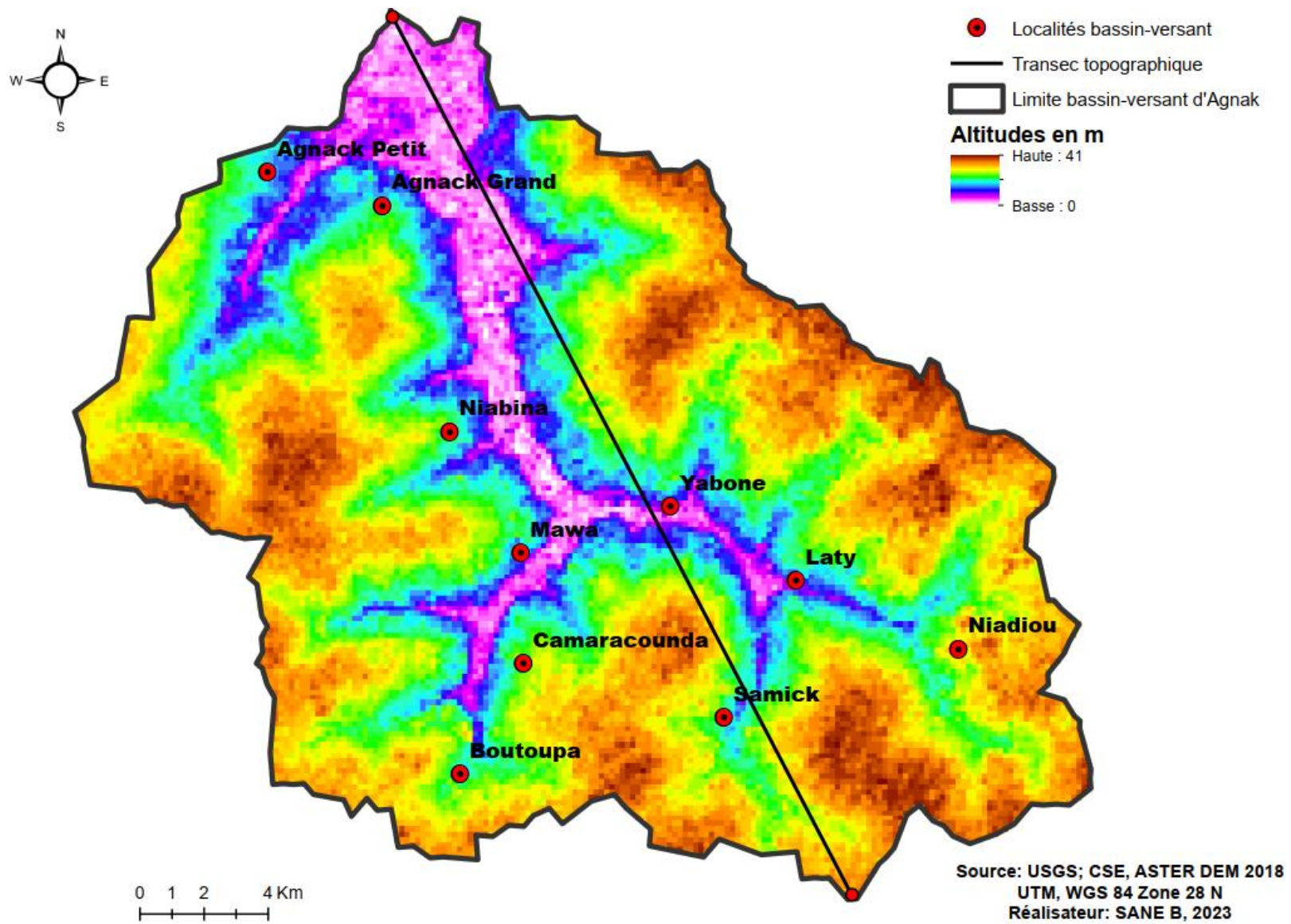
A première vue, nous notons un relief constitué d'altitudes faibles dans l'étendue des deux bassins (carte 5). Cette lecture confirme le caractère monotone des caractéristiques du relief de la Casamance annoncées dans les études de Seck (1955) et Dacosta (1989), notamment des altitudes qui ne dépassent pas en principe les 50 m. Ce constat frappant renseigne sur une structure presque tabulaire dans les deux bassins. Les seuls reliefs notables que l'on rencontre dans le bassin d'Agnak se situent au niveau du versant sud-est et est du bassin au niveau des plateaux de Camaracounda, Samick, et Niadiou. C'est dans cette partie du bassin que se trouvent les altitudes les plus élevées comprises entre 30 et 38 m (carte 6).

Les villages de Mawa, Niabina, Agnak-Grand et Agnak-Petit se localisent dans la partie ouest qui constitue le talus du bassin versant. Puisque les altitudes sont comprises entre 13 et 20 m, elle est la zone la plus basse du bassin. Également, la zone de talus est composée en général de sols hydromorphes à texture relativement faible. La dépression d'Agnak-Petit est la plus importante. C'est là que se trouve la mare portant le même nom. La pente de cette dépression est assez forte et qu'un nombre important de ravins est identifié dans cette partie du bassin. En plus du ravinement, des dépôts alluvionnaires s'effectuent tout au long du lit mineur de ce marigot, surtout en période de forte crue. En plus de la classe d'altitudes de 13-20 m, nous observons une dépression plus forte c'est-à-dire celle comprise entre 1-20 m. En effet, cette partie est souvent mouillée, d'où une présence importante de sols argileux et de particules de limons issus du dépôt sédimentaire.

Les bassins de la Casamance et de ses affluents se caractérisent par la faiblesse de leur relief, car tous les cours d'eau prennent leur source sur le plateau du Continental Terminal à 50 m d'altitude (Dacosta, 1989).



Carte 5 : Caractéristiques topographiques du bassin versant de Djibonker



Carte 6 : Caractéristiques topographiques du bassin versant d'Agnak

En comparant les profils topographiques de la structure du relief des bassins, une importante hétérogénéité s'observe spécifiquement au niveau du bassin d'Agnak. D'abord, le bassin d'Agnak est caractérisé par des altitudes moins élevées (altitude maximale : 41 m) que celles du bassin de Djibonker dont l'altitude maximale se situe à 42 m (fig. 7). Toutefois, son relief est presque homogène avec de légères différences. On peut parcourir jusqu'à une distance de 6 km suivant le transect topographique pour obtenir des altitudes minimales proches de 5 m. Il faut aller jusqu'à plus de 15 km en amont du terroir de Sindon pour voir des altitudes de plus de 25 m. La forme du relief d'Agnak ressemble à un cours d'eau sinueux. En effet, on observe une forme plus concave de vallées qui se distinguent. De plus, l'apport fluvial pourrait constituer le facteur explicatif de la particularité du relief de ce bassin. On peut penser aux impacts des différentes activités de mise en valeur des terres effectuées par les populations.

Dans le bassin de Djibonker, les caractéristiques du relief sont aussi de types monotones. Les altitudes les plus élevées sont comprises entre 30 et 42 m. C'est dans la partie nord-est et sud où se trouvent respectivement les plateaux de Brin, de Djibonker et de Boffa-Bayotte avec des hauteurs avoisinant les 41 m (fig. 7). Les villages de Darsalam, de Katouré et de Bourofaye-Bainouck sont localisés au pied de la grande vallée. Dans cette cuvette, se trouvent les deux plus importantes vallées du bassin : Mpack et Binako. Au niveau de cette partie, une importante crue est enregistrée pendant la saison des pluies. D'ailleurs, cinq ouvrages de régulation d'eau sont installés sur ces deux vallées respectives. Les habitants qui se trouvent au niveau des localités en amont de l'ouvrage, Mpack et Baffa Bayotte en particulier, subissent les conséquences d'une mauvaise gestion de l'eau. Ces villages se localisent à 35 m d'altitude suivant le transect topographique du bassin.

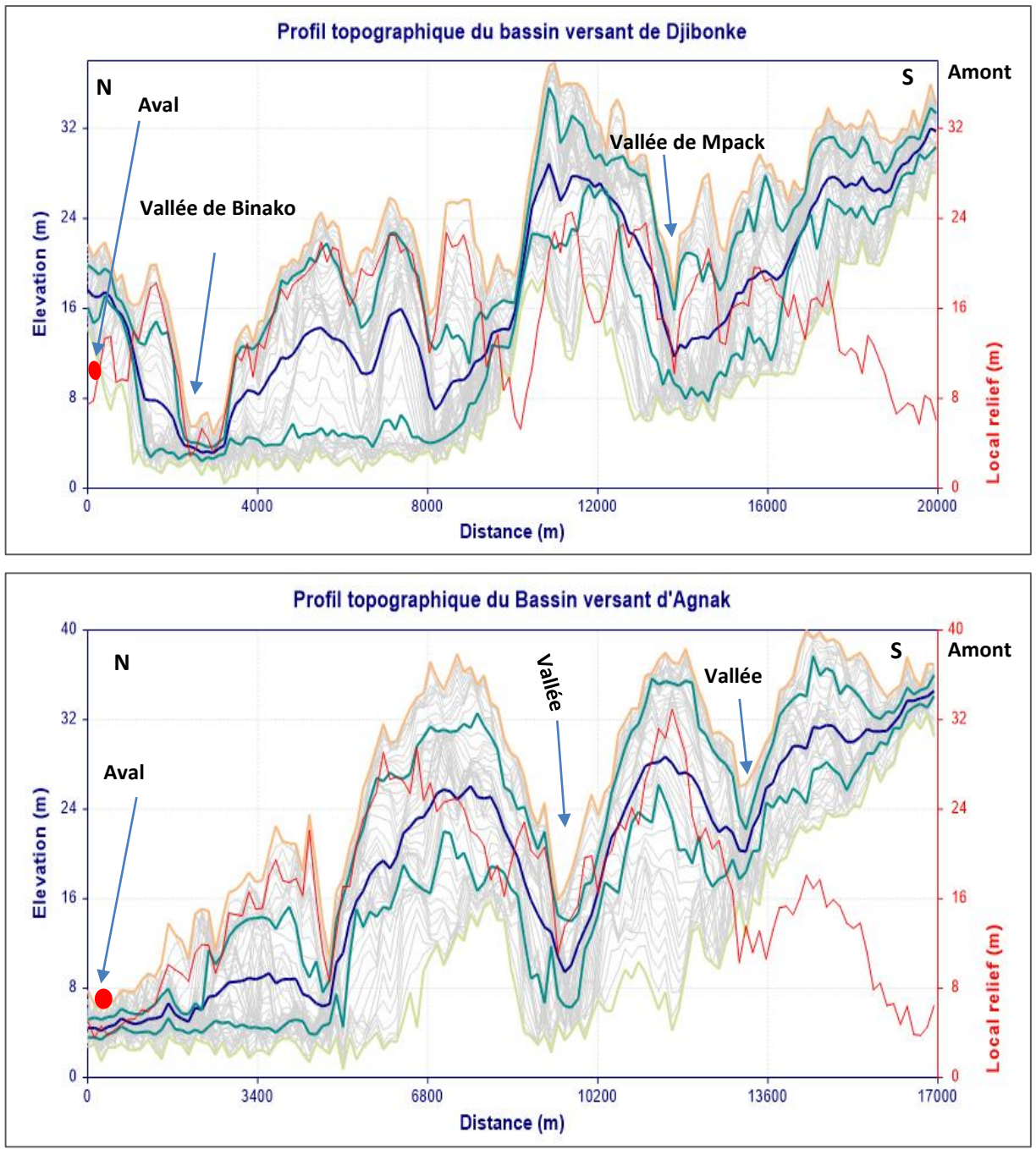


Figure 7: Transects topographiques des bassins versants de Djibonker et d'Agnak

II.2.1. Indices de pentes

Les valeurs des pentes sont déduites à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour les deux bassins d'étude. Les statistiques de référence sur les valeurs des pentes et leurs natures sont consignées dans le tableau 9.

Tableau 9: Valeurs de référence sur la classification des pentes des bassins versants

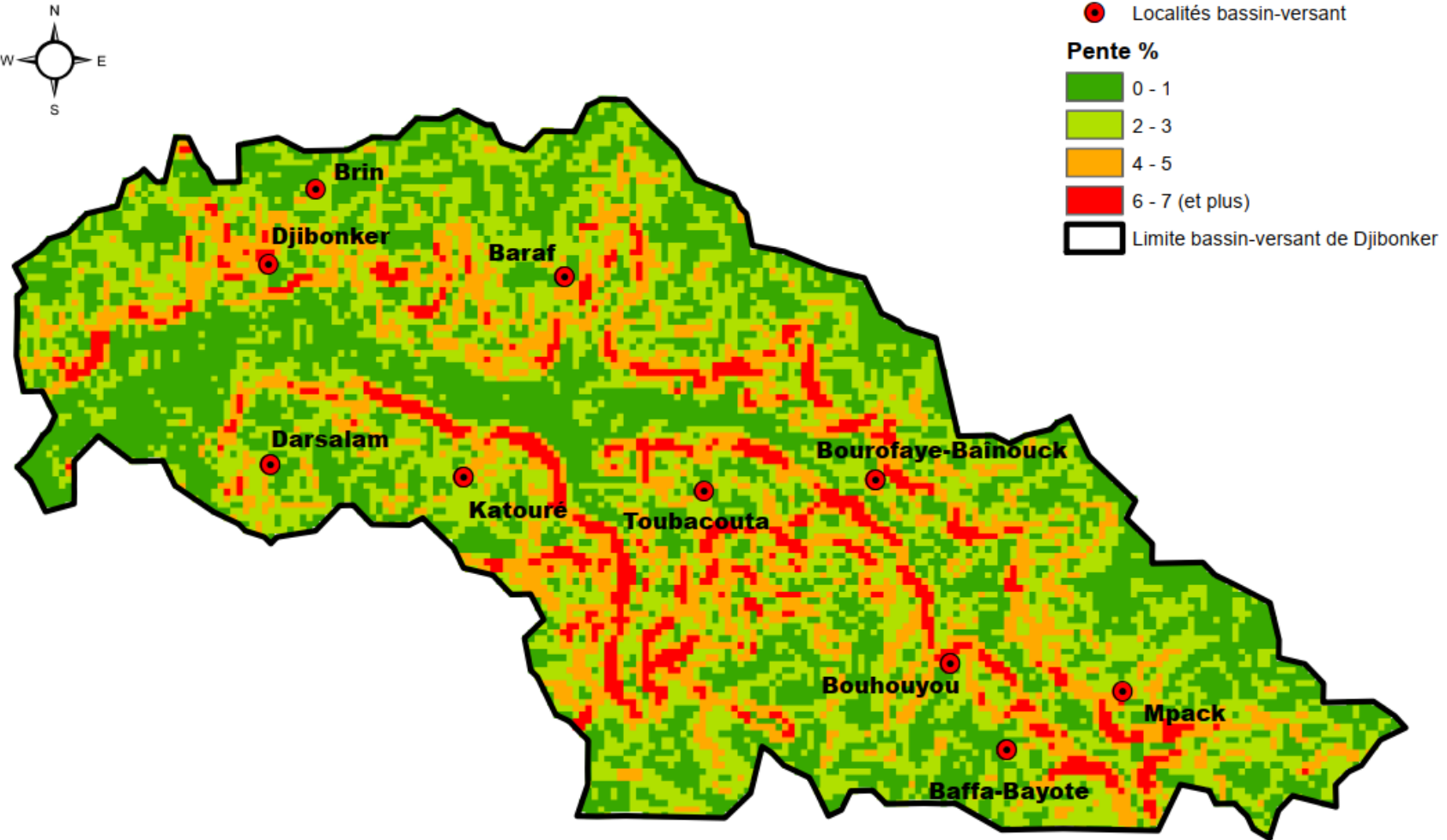
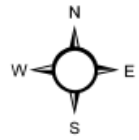
Classes	Valeurs	Nature de la pente
A	0 à 3 %	Faible
B	3 à 12 %	Modérée
C	12 à 20 %	Raides
D	20 à 35 %	Très raides
E	>35 %	Extrême >35 %

(Source : Rodier, 1982)

Les cartes 7 et 8 indiquent les classes de pentes des bassins d'étude. Selon la classification de Rodier (tableau 9), deux (2) classes de pentes sont identifiées dans nos bassins d'étude.

D'une part, nous avons des intervalles faibles, allant de 0 à 3 % qui occupent 70 % de la superficie des bassins. D'autres part, des valeurs de pentes modérées 4 à 7 % (et plus), sur 30 % des superficies des bassins versants. Elles sont localisées dans la partie nord en pied de talus. Il s'agit des parties où les cultures de rentes sont plus développées par les populations.

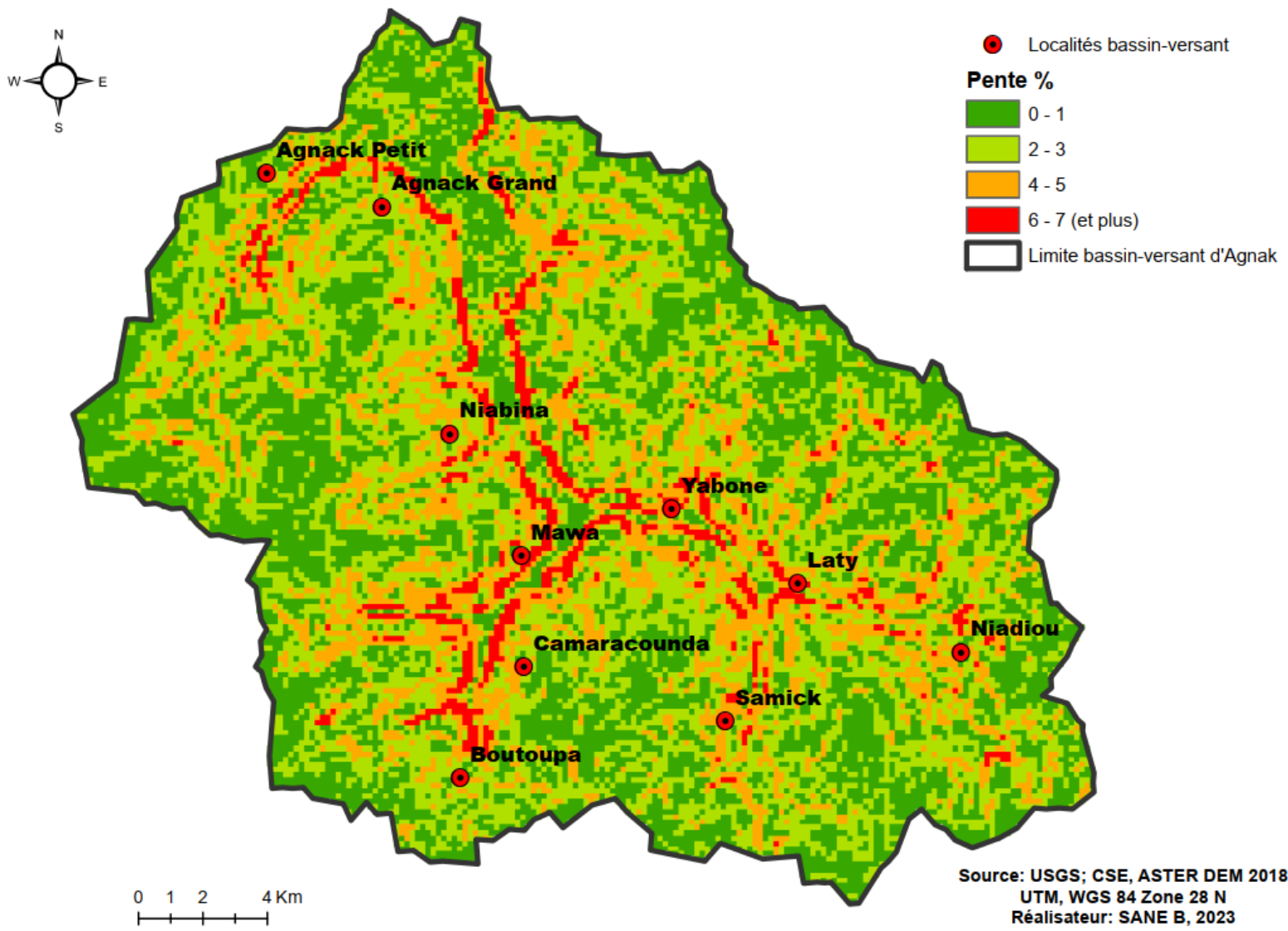
Ces dernières sont faiblement réparties dans les bassins d'étude. Dans le bassin d'Agnak, on observe ces types de pentes en amont des terroirs de Sindon et dans les terroirs de Laty, Yabone, Niadiou et Samick.



Source: USGS; CSE, ASTER DEM 2018
UTM, WGS 84 Zone 28 N
Réalisateur: SANE B, 2023

0 1 2 4 Km

Carte 7: Classes de pentes (%) du bassin versant de Djibonker



Carte 8: Classes de pentes (%) du bassin versant d'Agnak

II.3. Un réseau hydrographique complexe

Le réseau hydrographique est l'ensemble des affluents, sous affluents et drains appartenant à un même fleuve. L'ensemble des différentes ramifications d'un cours d'eau sont appelées réseau hydrographique.

Selon Laborde (2000), le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin. Également, le réseau hydrographique peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement (nombre et longueurs des cours d'eau) et son profil en long.

II.3.1. Description du réseau hydrographique de la zone d'étude

Le réseau hydrographique des bassins versants d'étude est constitué de marigots et de rivières à écoulement intermittent.

Le marigot de Djibonker se jette au niveau du Kamobeul *bolong* un important affluent du fleuve Casamance. La longueur du cours d'eau pérenne est de 8,46 Km. En aval de ce marigot, deux ouvrages de rétention d'eau y sont aménagés pour faciliter l'emblavement des périmètres rizicoles. Tout près de l'exutoire du marigot, une galerie de mangroves occupe la rive gauche du grand *bolong* de Kamobeul en amont de Darsalam et en aval du village de Djibonker.

Le marigot d'Agnak est long de 15,2 km. Il est aussi remonté par la marée. Ce marigot se jette dans le fleuve Casamance en amont du terroir villageois de Sindom.

La longueur de leurs cours pérennes est importante à tel enseigne qu'ils assurent un drainage régulier. Ils drainent la quasi-totalité des bassins versants de Djibonker et d'Agnak avec notamment leurs petits bras à écoulement intermittent. Le principal écoulement est noté en saison pluvieuse (août à octobre) et le niveau faible voire tarissement de certaines parties des rivières au courant des mois de mars à juin. Constitués de cours d'eau sinueux avec des méandres divagants tout au long des bassins, les bassins de Djibonker et d'Agnak ont un réseau hydrographique relativement important.

II.3.2. Hiérarchisation du réseau hydrographique et ordre des cours d'eau

C'est l'américain Horton (1932), puis Schumm (1954) et Strahler (1957) qui donnèrent l'expression mathématique de l'adage qui dit que « les petits ruisseaux font de grandes rivières ».

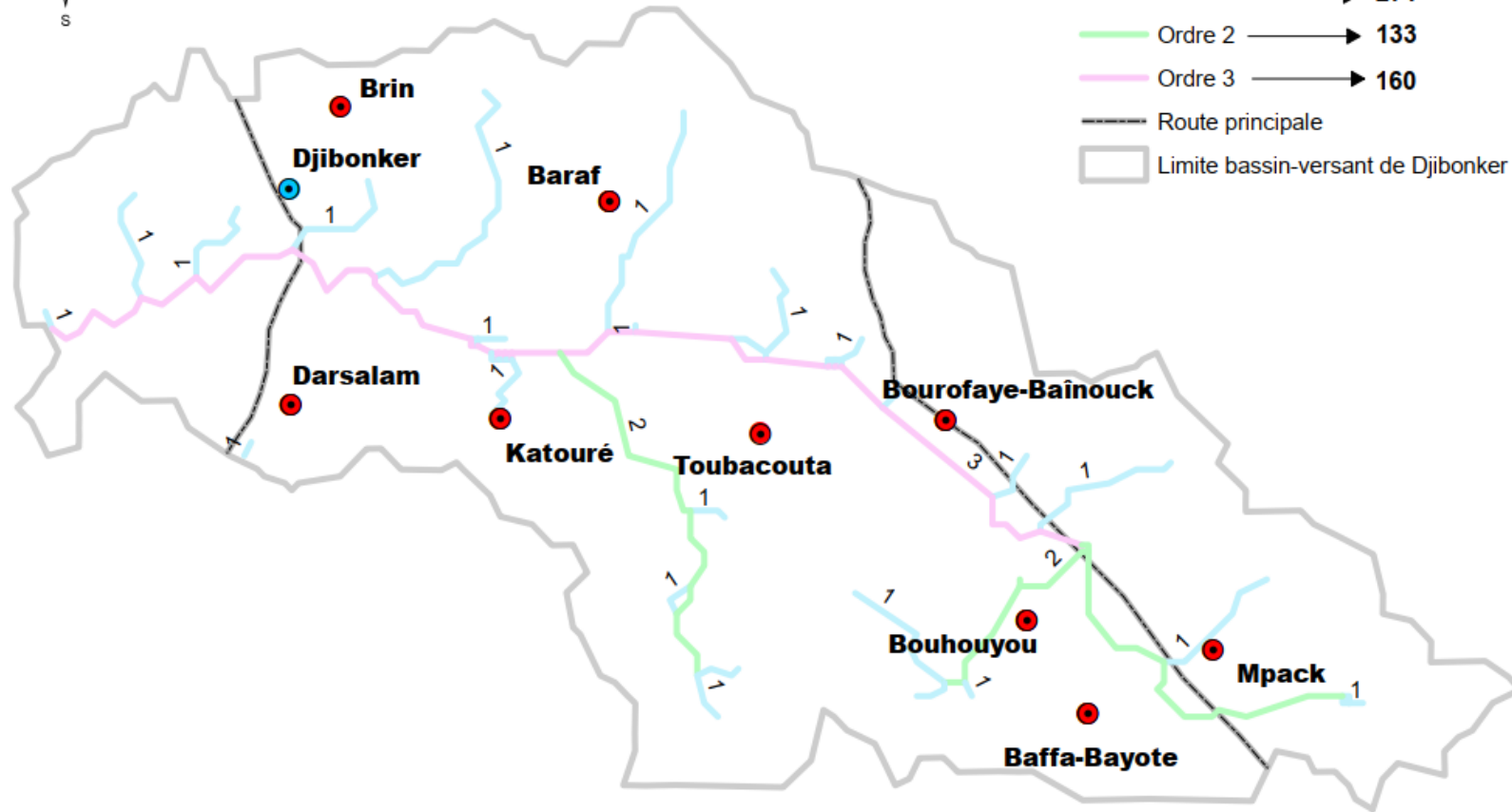
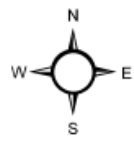
Nous avons utilisé la méthode de la topologie des cours d'eau (souvent utilisée pour caractériser la forme des cours d'eau) pour classer les différents tronçons par la méthode de Strahler (1957). Cette classification est facilitée par un système de numérotation des tronçons des cours d'eau. Il s'agit d'identifier les cours d'eau n'ayant pas d'affluents et de les attribuer l'ordre 1. Le cours principal (ordre 3) de chaque cours d'eau est alimenté par les affluents d'ordre 2, eux-mêmes approvisionnés par les affluents d'ordre 1. Alors $n+m=n+1$

$$n+m=m \quad \text{si } m > n$$

$$n+m=n \quad \text{si } n > m$$

Cette formule permet de calculer la fréquence des talwegs d'ordre 1. Plus la fréquence est proche de 1, plus la rivière est petite.

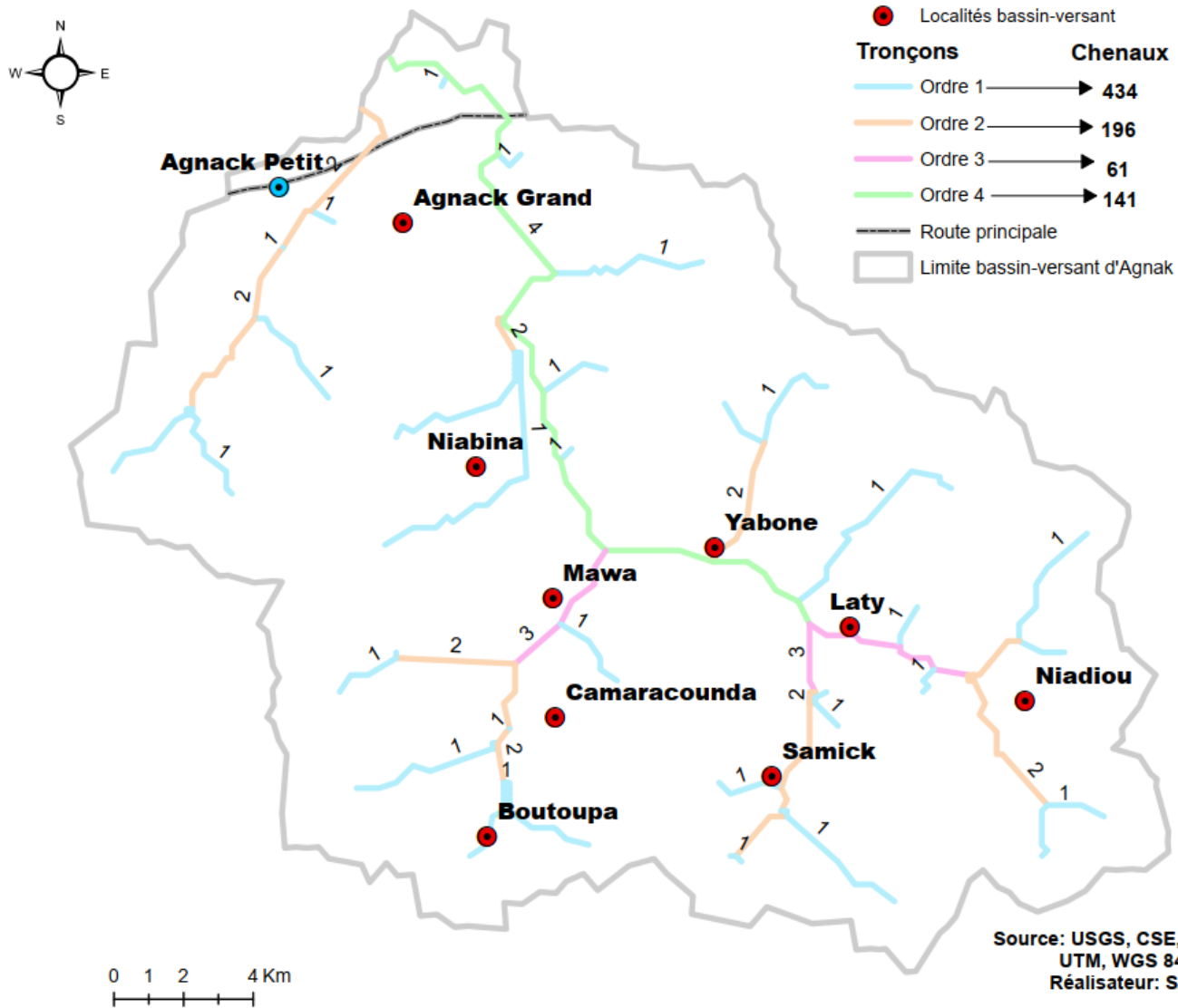
$F1=EN1/A$. Le réseau hydrographique du bassin versant de Djibonker est constitué principalement de trois (3) tronçons (carte 9) tandis que celui d'Agnak, est composé de quatre (4) traçons (carte 10).



0 1 2 4 Km

Source: USGS; CSE, ASTER DEM 2018
UTM, WGS 84 Zone 28 N
Réalisateur: SANE B, 2023

Carte 9 : Hiérarchie des cours d'eau du bassin versant de Djibonker selon Strahler (1957)



Carte 10 : Hiérarchie des cours d'eau du bassin versant d'Agnak selon Strahler (1957)

II.3.3. Longueur du cours d'eau principal

Les cours d'eau, en principe avec leurs caractères sinueux, se rétrécissent en fonction des différentes périodes d'apports externes (précipitations, sédiments, etc.). La longueur du cours d'eau principal (L) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin (Djoukbal, 2019). Si les deux segments à l'embranchement sont du même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface. Sa longueur peut avoir un atout sur les périodes d'approvisionnement des affluents d'ordre 1 et ceux secondaires.

D'après les calculs assortis du traitement MNT, les longueurs des principaux cours permanents du réseau des bassins étudiés se présentent comme suit :

15,21 km (Agnak) et 8,46 km (Djibonker)

II.3.4. Pente moyenne du cours d'eau principal

La pente moyenne d'un cours d'eau détermine la vitesse à laquelle l'eau atteint la sortie du bassin versant (l'exutoire), donc le temps de concentration. Cette variable influence le débit observé. Une forte pente favorise et accélère le flux de surface, tandis qu'une pente douce et nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, en tout, ou en partie dans le sol. La pente moyenne d'un cours d'eau est calculée à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal. La méthode consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du flux donnée par la relation suivante. :

$$P_{moy} = \Delta H / L$$

P_{moy} : Pente moyenne du cours d'eau (m/km) ou (m/m) ; ΔH : Dénivelée maximale du cours d'eau et L : Longueur du Talweg (km) ou (m).

II.3.5. Densité du drainage des cours d'eau

Ce paramètre est calculé pour l'étude des crues d'une rivière. Il permet de voir la capacité d'une rivière, d'un fleuve, de drainer les eaux d'un bassin et les amener à l'exutoire. Le rapport entre la longueur totale des cours d'eau de tout ordre et la superficie du bassin est défini comme la densité de drainage et est exprimé en km/km². La proximité dans l'espacement des canaux peut être identifiée par l'utilisation de la densité de drainage. Cela est utile pour la mesure quantitative de longueur moyenne d'un cours d'eau par rapport à la

surface du bassin versant (Faye *et al*, 2021). Elle est regroupée en cinq (5) classes différentes : très grossière (<1,2), faible (1,2 à 2,4), modérée (2,4 à 3,6), élevée (3,6 à 4,8), et très élevée (4,8 à 6). Selon Strahler (1964), une densité de drainage élevée indique une perméabilité plus faible, une végétation clairsemée et un relief accidenté tandis qu'une densité plus faible indique une perméabilité plus élevée.

Elle est obtenue par la formule suivante :

$$Dd = \Sigma Li \div \sqrt{A}$$

Les densités de drainage des bassins de Djibonker et d'Agnak sont respectivement de **5,66** et **11,24** (tableau 10). Ces valeurs élevées indiquent que le caractère faible du relief des bassins, du substratum et le couvert forestier moyennement dense participent à la modification de la structure du réseau hydrographique. Toutefois, ces marigots restent salés pendant la saison sèche et cette salinité a des impacts sur les pratiques culturelles des populations.

Tableau 10: Densités de drainage des cours d'eau classifiés selon Strahler (1957)

Bassin versant d'Agnak			Bassin versant de Djibonker		
Ordres	Longueurs d'ordre Ni (km)	Densités de drainage	Ordres	Longueurs d'ordre Ni	Densités de drainage
1	60,73	5,64	1	33,06	3,18
2	29,59	2,74	2	17,42	1,67
3	15,64	1,45	3	8,46	0,81
4	15,21	1,41	-	-	-
Total	121,2	11,24	-	58,94	5,66

II.3.6. Constante de stabilité du cours d'eau

D'après Schumm (1954), la valeur inverse de la densité de drainage est une constante de stabilité du cours d'eau. La constante se calcule comme suit :

$$C = \frac{1}{Dd}$$

$C=0,17 \text{ Km}^{-1}$ et $0,08 \text{ km}^{-1}$ respectivement pour les bassins de Djibonker et d'Agnak

II.3.7. Densité hydrographique

La densité hydrographique décrit le nombre de cours d'eau par unité de surface dans un bassin hydrographique. Elle permet d'avoir une idée sur la hiérarchisation ou la distribution du réseau sur chaque portion physique du bassin versant. Elle est obtenue à partir de la formule suivante :

$$F = \frac{\sum Ni}{A}$$

Où :

- ✓ F : Densité hydrographique
- ✓ Ni : Nombre de cours d'eau
- ✓ A : Superficie du bassin

Les densités hydrographiques moyennes des bassins d'Agnak et de Djibonker, qui sont respectivement de 0,46 et 0,26, sont de faibles, autrement dit, les bassins d'étude sont dans une couche à substratum perméable, à couvert végétal important et à relief moins accidenté (tableau 11).

Tableau 11 : Récapitulatif des densités hydrographiques des cours d'eau étudiés

BV_Agnak			BV_Djibonker		
Ordre	Nombre des cours d'eau	Densités hydrographiques	Ordre	Nombre des cours d'eau	Densités hydrographiques
1	130	1,12	1	54	0,50
2	21	0,18	2	18	0,17
3	17	0,15	3	14	0,13
4	5	0,04	-	-	-

II.3.8. Rapports de confluence et de longueur des cours d'eau

Pour cette étude, nous avons jugé nécessaire de connaître la nature des bassins versants choisis. Dans une perspective de voir s'il existe une quelconque homogénéité entre les chevelus hydrographiques. D'après Horton (1932) et Schum (1956), les relations

mathématiques ci-dessous sont établies pour connaître le rapport de confluence et la longueur des cours d'eau :

$$Rc = Ni \div Ni + 1 \quad RL = Li \div Li + 1$$

Avec :

- ✓ Rc : rapport de confluence
- ✓ RL : rapport des longueurs des cours d'eau
- ✓ Ni : nombre des cours d'eau d'ordre i
- ✓ Li : longueur moyenne des cours d'eau d'ordre i
- ✓ Ni+1 : nombre des cours d'eau d'ordre suivant
- ✓ Li+1 : longueur des cours d'eau d'ordre suivant

Le tableau 12 donne le détail des rapports de confluence et de longueur des cours d'eau des bassins étudiés.

Tableau 12 : Synthèse des rapports de confluence et des rapports des longueurs des cours d'eau étudiés

BV_Agnak					BV_Djibonker				
Ordre	Li	Ni	RC	RL	Ordre	Li	Ni	RC	RL
1	60,7	130	-	-	1	33,06	54	-	
2	29,6	21	6,19	2,05	2	17,42	18	3	1,89
3	15,6	17	1,23	1,89	3	8,46	14	1,28	2,05
4	15,2	5	3,4	1,02	-	-	-	-	-

II.3.9. Fréquence des cours d'eau

La fréquence des cours d'eau permet d'avoir une idée sur la hiérarchisation ou la densité du réseau dans le bassin. Un réseau dense donne une idée sur l'eau de surface disponible et de son temps de concentration dans les vallées drainées. Le rapport du nombre de cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant permet de connaître la fréquence des cours d'eau.

Les fréquences des cours d'eau des bassins d'Agnak et Djibonker sont respectivement de :

$$Fr = 1,12 \text{ km et } 0,50 \text{ km}$$

II.3.10. Coefficient de torrentialité

Le coefficient de torrentialité s'obtient à partir du rapport entre la fréquence du cours d'eau d'ordre 1 et la densité de drainage du bassin. Pour les bassins de Djibonker et d'Agnak, deux coefficients faibles sont trouvés ; ce qui montre le caractère faible de la hiérarchisation du réseau hydrographique.

$$Ct = Dd * F$$

Dd : Densité de drainage

F : Fréquence des cours d'ordre 1

$$Ct = 0,08 \text{ km (Djionker)} \text{ et } 0,09 \text{ km (Agnak)}$$

Ces valeurs montrent également que les deux bassins versants n'ont pas des caractéristiques morphométriques fortement adaptées à l'écoulement. Cependant, ils peuvent obtenir des formations perméables dont le taux d'infiltration est principalement important en fonction de leur localisation géographique sur l'étendue de chaque bassin.

II.3.11. Temps de concentration

Il s'agit d'estimer le temps que fait une goutte d'eau tombée sur un bassin avant de rejoindre l'exutoire ou perdre une partie de son volume superficiel (infiltration, évaporation ou ruissellement). Le temps de concentration donne une idée sur la façon dont réagit un bassin versant face à une sollicitation (pluie). La détermination du temps de concentration permet de mieux connaître la réponse hydrologique du bassin. Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface, mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief (Guesri, 2021). On peut déduire ce paramètre à partir du talweg principal (L), de l'altitude (m) et de la surface du bassin (SBv) en km² comme le suggère la formule suivante de Giandotti (1934).

$$Tc = \frac{4(A + 1,5L)^{0,5}}{0,8(Hmoy - Hmin)^{0,5}}$$

L : Longueur du cours d'eau principal (km)

Hmoy : Altitude moyenne (m)

Hmin : Altitude minimale

A : Superficie du bassin versant (Km²)

Les résultats obtenus de l'application de la formule empirique de Giandotti (1934) indiquent que les temps de concentration moyens des eaux dans les bassins de Djibonker et d'Agnak sont respectivement : 5,26 h (Agnak) et 5,12 h (Djibonker).

Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la forme du bassin mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie (les formations perméables favorisent l'infiltration au dépend du ruissellement ce qui fait retarder la concentration des eaux à l'exutoire), la pluviométrie (l'intensité pluviométrique pluviale est importante plus le temps de concentration est court et ceci quel que soit la nature du sol) et le relief (Hamed et Bouanani, 2016). La correspondance qu'on observe entre les variables calculées peut s'expliquer par la position géographique des bassins.

II.3.12. Vitesse d'écoulement de l'eau

La vitesse de l'écoulement est donnée par l'expression suivante :

$$V_e = \frac{L}{t_c}$$

Ve : Vitesse d'écoulement de l'eau (m/s) ;

L : Longueur du talweg principal (m) ;

Tc : Temps de concentration en (s)

La vitesse d'écoulement pour les deux bassins est de :

Ve (Agnak)=27,06m/s ; Ve (Djibonker)= 46,49m/s. L'écoulement est plus rapide dans le bassin de Djibonker que dans celui d'Agnak.

II.4. Relation entre les variables morphométriques : Analyse en Composantes principales (ACP)

L'analyse morphométrique est une démarche importante pour la hiérarchisation des bassins versants même sans tenir compte de la carte des sols (Biswas *et al.*, 1999). Pour la compréhension du dynamisme des rivières, on peut faire recours aux variables ou paramètres comme : la pente, le périmètre, le coefficient de GRAVELIUS, la pente moyenne du bassin et la longueur du rectangle équivalent (Veltri *et al.*, 1996 et Faye, 2020). Les paramètres

morphométriques aident à la connaissance des types de bassins versants. On observe deux groupes de variables importants pour appréhender les formes des bassins versants.

Il se dégage des variables de dimension (pente, forme du bassin, rectangle équivalent) qui donnent une idée sur la forme des bassins versants. Les secondes variables sont considérées comme celles qui sont intrinsèques aux variables de dimension. Elles réagissent fortement face à une sollicitation. La méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP) est utilisée pour faire ressortir les corrélations existantes entre les variables morphométriques des deux bassins. Elle permet, à partir d'une matrice à n échantillons (individus) et p variables, la description du nuage de points dans un espace à p dimensions (RIAD, 2003).

II.4.1. Méthodes de traitements des variables morphométriques

L'analyse statistique permet de mieux appréhender deux variables ou individus différents. Pour effectuer cette analyse, on peut partir de plusieurs approches de traitements en fonction du nombre de variables à analyser, des types de données disponibles et des résultats escomptés.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique statistique largement utilisée (Eslamian *et al.*, 2010 ; Hamed et Bouanani, 2016 ; Tidjiani *et al.*, 2010, Faye *et al.*, 2014). Elle réduit le nombre de variables à celles qui sont les plus significatives parmi un ensemble de variables et est utilisée afin de trouver un lien entre les variables et les individus afin de les regrouper en régions homogènes (Hamed et Bouanani, 2016). L'un des objectifs des ACP est d'obtenir des informations utiles à partir d'une matrice de données permettant de comprendre la relation entre les variables ou individus et de faciliter l'analyse des résultats qui en découlent.

L'interprétation des corrélations entre les variables est facilitée par des cercles de corrélation. Il s'agit d'une représentation graphique des corrélations entre les variables initiales et les axes principaux. Une variable est d'autant mieux représentée dans le plan qu'elle est proche du bord du cercle. L'interprétation se fait comme suit :

- deux variables proches du centre du cercle sont en général mal représentées par les facteurs ;
- deux variables proches entre elles du bord du cercle sont fortement et positivement corrélées ;

-deux variables diamétralement opposées et proches du bord du cercle sont fortement et négativement corrélés (Houda, 2009).

Notre travail de corrélation est appliqué à deux individus (Djibonker et Agnak) et 21 variables obtenues à partir du MNT. Il s'agit de : la superficie (A), du périmètre (P), du coefficient de compacité (Kc), altitudes (Hmax, Hmin et Hmoy), la dénivelé spécifique (Ds), la longueur rectangle équivalent (RL), la largeur du rectangle équivalent (lrec), la pente moyenne (lbv), la longueur du talweg principal (L), la pente moyenne du cours d'eau principal (Icp), l'indice de pente global (Ig), la densité de drainage (Dd), la densité hydrographique (F), le rapport de confluence des cours d'eau (Rc), le rapport de longueurs des cours d'eau (RL), le coefficient de torrentialité (Ct), la vitesse de l'écoulement (Ve), la fréquence des cours d'eau (Fr), la constance de stabilité du cours d'eau (C). Ce sont des variables morphométriques linéaires et de dimension du bassin versant. Faire une analyse linéaire entre ces paramètres aide à mieux faire ressortir les caractéristiques physiques des bassins. Les variables sont extraites sur l'image Aster DEM d'une résolution de 30 m.

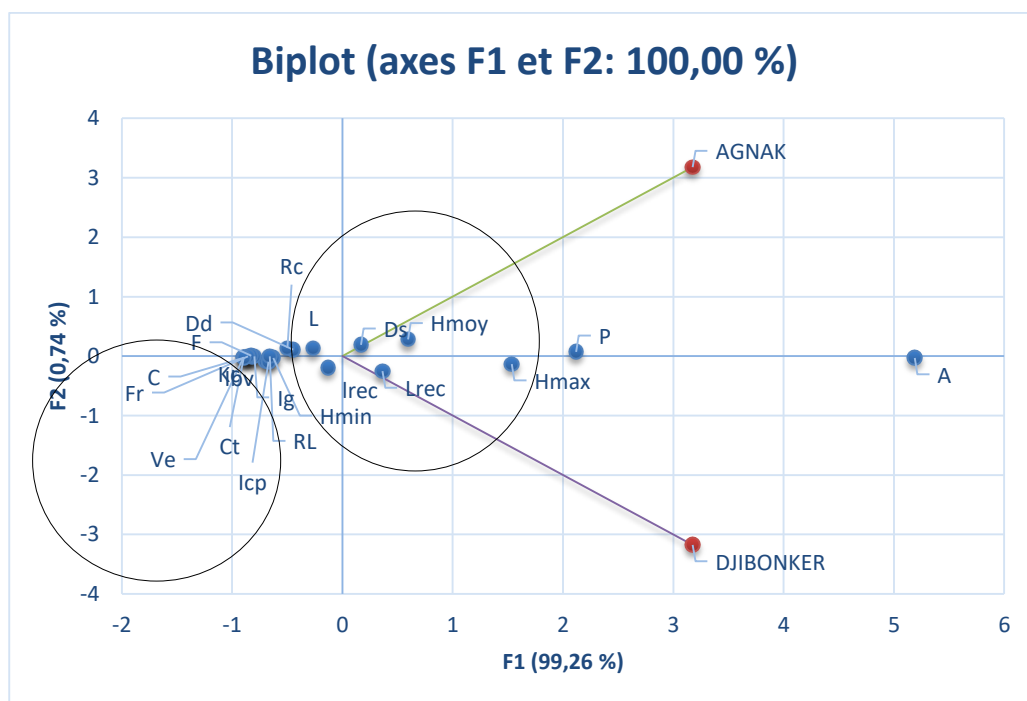


Figure 8: Vue sur le plan factoriel des paramètres morphométrique et des individus des bassins de Djibonker et Agnak

Les deux bassins ont des caractéristiques morphométriques semblables à quelques différences près du fait de leur position géographique.

Sur l'axe 1, les deux bassins sont corrélés positivement, vue leurs localisations géographiques. Les variables de dimension à savoir la surface (A), le périmètre (P), l'altitude maximale (Hmax), l'altitude moyenne (Hmoy) et la longueur du rectangle équivalent (Lrec) sont plus corrélées à l'axe 1. Elles ont une corrélation forte (0,99) sur le plan factoriel.

Sur l'axe 2, les deux bassins ne se définissent pas de la même façon. En effet, on constate que le bassin d'Agnak a une corrélation positive, contrairement au bassin de Djibonker, qui dispose d'une corrélation négative (fig.8). Les variables corrélées positivement à l'axe 2 sont : la densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc), la longueur du Talweg principal (L), le dénivelé spécifique (Ds), l'altitude maximale (Hmax) et le périmètre (P).

Sur l'axe 1, les variables corrélées négativement sont : la longueur du talweg principal (L), la pente moyenne (Imoy), la largeur du rectangle équivalent (lrec) et le rapport de confluence du cours d'eau (Rc).

Outre les valeurs des Kc (coefficients de Compacité), les valeurs des autres variables se rapprochent à un degré de différence faible. La monotonie du relief de la Casamance en général, peut expliquer en partie les relations fortes existantes entre les variables des bassins versants.

II.5. Analyse des éléments pédo-géologiques

Le littoral de la Casamance se présente comme une zone basse dont les rives sont caractérisées par plusieurs matériaux détritiques. L'étude des éléments de la pédogénèse de ce bassin est assujettie à l'évolution géologique qu'a connue le bassin en général. Les bassins de Djibonker et d'Agnak se trouvent dans la zone alluviale fluvio-marine du bassin de la Casamance. Cette zone regorge d'importantes potentialités hydriques, économiques, des sols favorables au développement d'activités agricoles. Toutefois, ces terres subissent l'influence marine.

II.5.1. Étude de l'évolution géologique du bassin de la Casamance

La Casamance, constitue du point de vue géologique, la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, l'un des plus vastes bassins du littoral ouest-africain. Le socle métamorphique paléozoïque, constitué de schistes, de grès, de quartzites, traversé par un complexe volcanique effusive (rhyolites, dolérites) se situerait, d'après les recherches géophysiques et les forages pétroliers, à plus de 7000 m en Basse-Casamance (Diop *et al.*,

1987). Les formations géologiques du bassin sédimentaire de la Casamance ont connu une évolution considérable au cours de l'histoire. Le grand bassin de la Casamance s'étend sur plusieurs formations géologiques partant du fleuve à l'intérieur des terres fermes.

II.5.1.1. Les formations de l'Eocène

Le bassin de la Casamance est caractérisé à l'Eocène inférieur par des dépôts de calcaires, d'argiles et de marnes transgressifs sur des sédiments détritiques d'âge Paléocène (Monciardini, 1966 ; Ly, 1985 ; Thiam, 2014). L'Eocène inférieur est marqué par un renouvellement des faciès dominés par l'argile. Cette homogénéisation de la sédimentation traduit une forte poussée transgressive dont les dépôts vont déborder les limites du bassin paléocène. A l'échelle du bassin sédimentaire, la connaissance de la série est inféodée aux données apportées par les sondages pétroliers et hydrauliques. En Casamance, cette série de l'Eocène évolue avec la transgression marine venant façonner ses faciès. Elle s'amincit en partie du fait de l'érosion de son toit à la bordure sud du bassin de la Casamance où la série cumule moins de 50 m de puissance. Dans cette région, les faciès, décrits par Ly (1985) et Ly et Carbonnel (1987), se composent de calcaires argileux à foraminifères planctoniques et couvrent l'intervalle stratigraphique. Les résultats obtenus par Thiam (2014) ont défini deux ensembles lithologiques sur le bassin de la Casamance durant la période de l'Eocène : un ensemble inférieur caractérisé par une succession de calcaires, de calcaires argileux et de marnes, et un ensemble supérieur constitué de dépôts détritiques formés de sables, de sables argileux et d'argiles. L'échelle de l'Eocène est caractérisée en Casamance par des périodes de transgression et régression, notamment une disparition de certaines espèces (début de l'Eocène moyen) et une baisse des températures d'eau qui s'enrichit en oxygène, mais aussi une perte de la biodiversité des assemblages liée à l'arrivée d'eau froide dans le bassin, notamment à l'Eocène supérieur (Thiam et Sarr, 2018).

II.5.1.2. Les dépôts post-éocènes

A l'Oligocène et au Miocène inférieur, le bassin sédimentaire sénégalais est largement exondé. Par contre, au golf de la Casamance la sédimentation marine commence à se restreindre, où les sondages pétroliers montrent l'existence d'une série marine Oligo-Miocène. Cette absence de dépôts est observée depuis le passage de l'Eocène supérieur à l'Oligocène (Ly et Carbonnel, 1987). La sédimentation marine a repris en Casamance maritime à la fin de l'Oligocène déposant des faciès de calcaires sableux (Ly, 1985).

Plus à l'ouest du bassin, dans les sondages de Diogué et Ziguinchor, une série d'argiles (plus ou moins sableuses) et de lits calcaires est retrouvée. Elle a servi de référence pour la définition de la formation de Ziguinchor. Au cours du Miocène, des sédiments argilo-sableux de 50 à 150 m de puissance se sont déposés sur l'ensemble de la Basse-Casamance. C'est au cours de cette période qu'intervient une importante phase tectonique cassante (Diop *et al.*, 1987). Les cours, en suivant les lignes de fracture, dessinent des coudes brusques qui caractérisent le cours de la Casamance et ses affluents nommés localement *bolongs* (Diop *et al.*, 1987). Après la régression post-miocène, il s'est déposé un sédiment détritique dont le principal faciès est un grès hétérométrique, argileux, bariolé, appelé Continental Terminal (Tessier, 1952 ; Millot, 1967).

Les formations du Continental Terminal présentent un relief mollement ondulé, altéré par la pédogenèse ferrallitique à l'image de la cuirasse gréso-ferrugineuse de Boucotte et du Cap-Skirring (Diop *et al.*, 1987). Ces plateaux très découpés (plateau d'Oussouye et de Diembéring dominant faiblement (15 à 30 m) la zone sédimentaire actuelle (Diop *et al.*, 1987).

II.5.1.3. Le Quaternaire

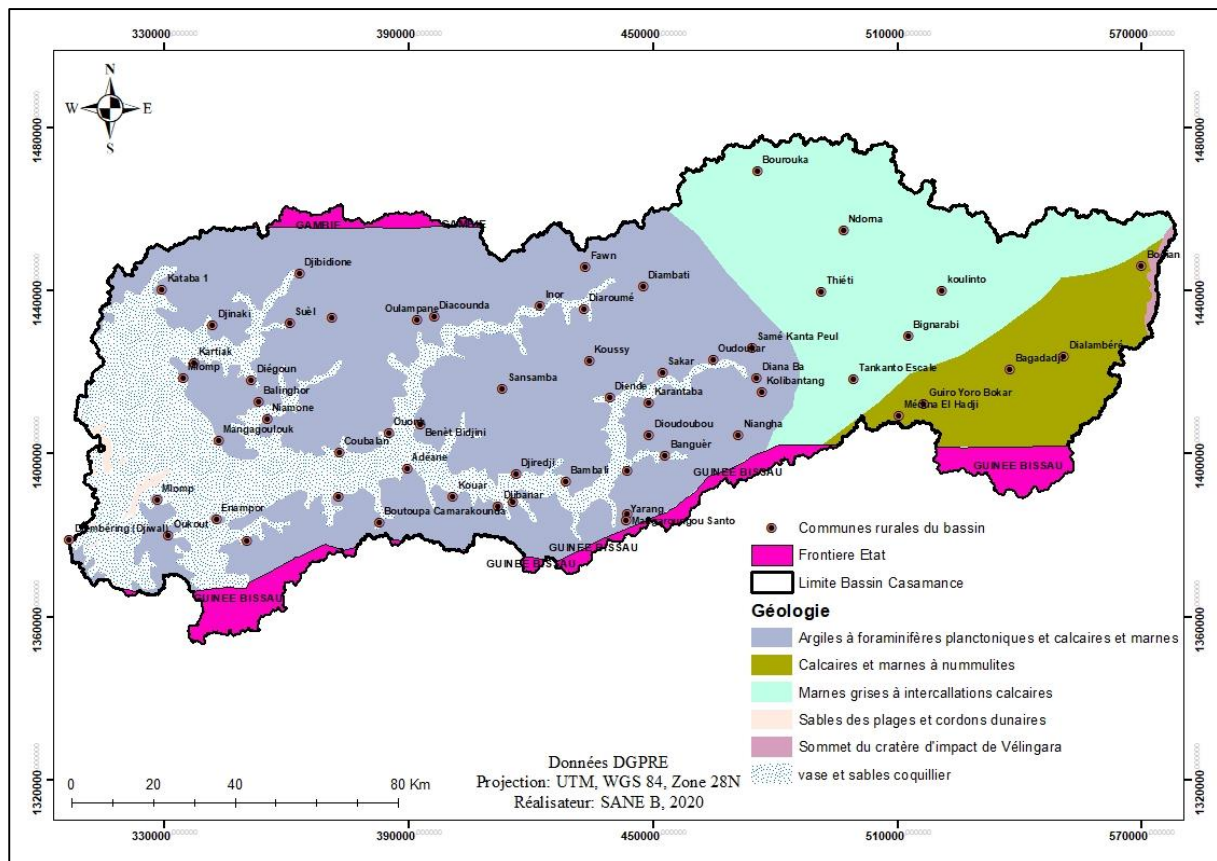
Au cours du Quaternaire récent, le bassin sédimentaire de la Casamance a connu d'importantes fluctuations (variations du niveau marin, changement climatique, etc.), surtout au niveau de la partie maritime. Les études de Michel (1973), Marius (1985), Diop *et al.* (1987) ont souligné l'évolution de cette formation en la divisant en quelques phases majeures :

- ✚ à partir de 30 000 BP débute une importante régression marine. Le niveau marin va atteindre sa côte minimale : - 120 m entre 20 000 et 17 000 BP (maximum glaciaire Würm). Durant cette période, la Casamance entaille profondément son lit. Le climat devient aride et les grandes dunes ogoliennes envahissent la majeure partie du Sénégal (15000-15000 BP) ;
- ✚ à partir de 14000 ans BP intervient une deuxième phase d'entaille appelée phase de recréusement des vallées (Michel, 1973). Les vallées s'enfoncent en doigts de gants à l'intérieur, disséquant les plateaux. Le niveau marin était encore bas et le climat semi-aride, avec un couvert végétal limité. C'est vers 12000 ans BP, après une très rapide remontée du niveau marin, que le climat devient de plus en plus humide : ce qui va permettre la rubéfaction des sables dunaires et des sols ferrallitiques ;

- ✚ après 8000 BP, nouvelle grande phase de transgression : la mer envahit l'estuaire de la Casamance en formant une ria. Le niveau marin atteint son niveau actuel vers 7000 BP. La transgression continue et vers 5500 BP, le niveau marin atteint sa côte maximale de plus de 2 m à 2,5 m (transgression nouakchottienne) ;
- ✚ enfin, vers 1500 BP, la Casamance prend une nouvelle allure comparable à l'actuelle. La fermeture du golf par des cordons littoraux entraîne la diminution des apports marins et provoque un ralentissement de l'évolution morphologique. Certaines unités comme les tannes apparaissent à l'arrière des mangroves à la faveur d'un climat sec qui conduit à la dernière transformation du paysage.

Pendant et après le Nouakchottien, la mer à déposer au pied du plateau du Continental Terminal, en Basse-Casamance, des sables bien triés qu'en amont et dans les entailles des marigots les dépôts étaient sableux à argilo-sableux (Dacosta, 1989). Après cette période de transgression et de régression notée pendant la période du Quaternaire, le cours de la Casamance reprendra sa forme vers 1500 B.P (Marius, 1985). Cette longue évolution géologique du Secondaire à l'actuel, a mis en place deux grandes régions géomorphologiques distinctes : le bassin continental (Haute et Moyenne Casamance) et le bassin maritime de la Basse-Casamance où l'influence marine est permanente (Dacosta, 1989). Le bassin maritime de la Basse-Casamance, d'après les études de Diouf *et al.* (1987) ; Niane (1984) ; Diop *et al.* (1987), est constitué de sols grésos-argileux issus de sédiments détritiques du Continental Terminal. En Basse-Casamance, le continental Terminal a été modelé en bas de plateaux mollement ondulés. Dans la partie sud de l'estuaire (zone d'Oussouye), ils sont très morcelés et ceinturés d'alluvions de différentes époques du Quaternaire. En revanche, dans la partie nord (zone de Bignona) le plateau est tranché au-dessous des sédiments récents par un système de failles mettant en évidence, à travers les entailles du réseau hydrographique, plusieurs niveaux cuirassés (Bovin, 1990). La variabilité hydroclimatique actuelle continue de participer à la reconfiguration physique des affluents de la Casamance. Il faut préciser que ces phénomènes concourent à la modification soit à l'apport du fonctionnement morphosédimentaire des rivières et des flux hydriques.

Les éléments géologiques actuels du bassin de la Casamance sont constitués de matériaux sédimentaires détritiques issus de l'agrégation de grains avec un faciès gréseux d'origine éolienne ou marine. Ce faciès gréseux occupe la plus grande partie du bassin de la Casamance (carte 11).



Carte 11 : Les formations géologiques du bassin de la Casamance

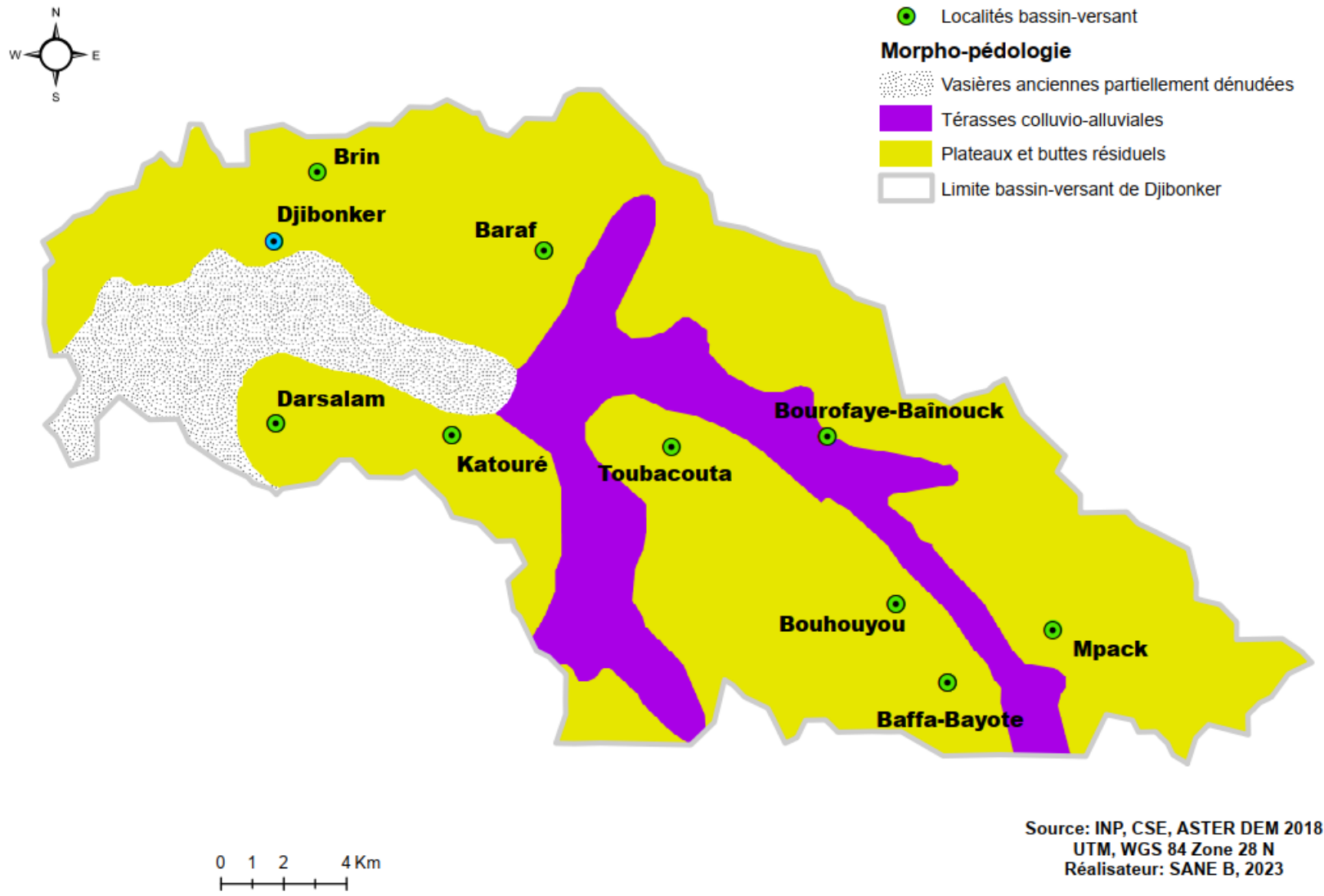
Les bassins de Djibonker et d’Agnak reposent donc sur des dépôts de vases, d’argiles, de calcaires et de marnes. Ces formations géologiques couvrent l’ensemble du périmètre des deux bassins. Les unités géologiques les plus identifiées dans les deux bassins sont les argiles, les calcaires et les marnes. Au niveau des interfluves prédominent les calcaires, qui sont souvent érodées par l’eau et arrachées sous forme de particules de sables fins déposés dans les vasières (vallées). Souvent constituées de particules de sables fins, les vasières sont remplies d’eau en saison pluvieuse et débordent jusqu’au lit majeur. Les vasières sont des lits d’eau où s’incise pratiquement le cours d’eau principal, donnant naissance aux ramifications secondaires du réseau hydrographique des bassins versants.

II.5.2. Morpho-pédologie des bassins étudiés

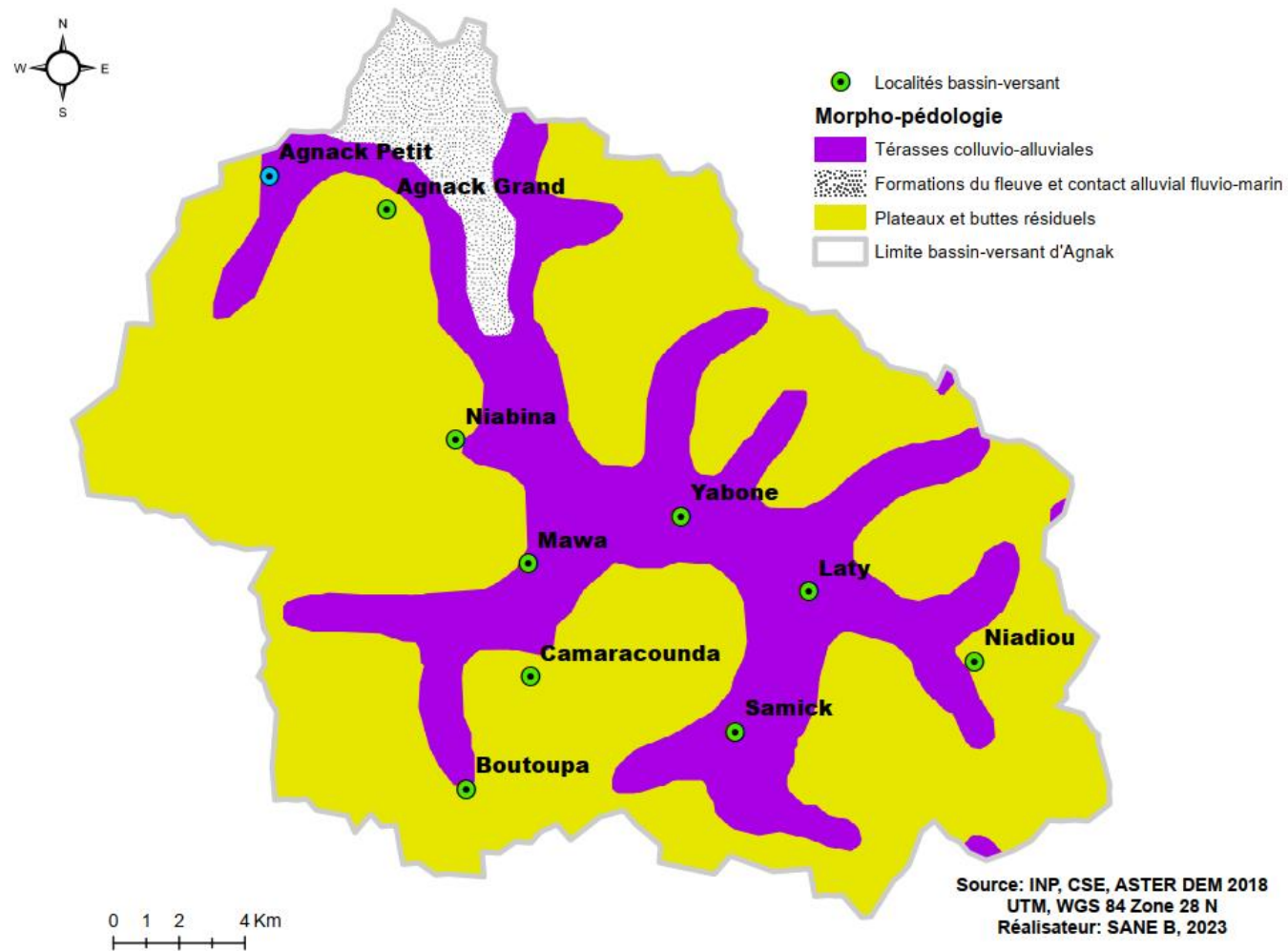
Les caractéristiques des unités géomorphologiques du bassin de la Casamance ne sont pas homogènes. On note, sur toute l’étendue des bassins étudiés des unités diverses qui se caractérisent par des lithologies un peu particulières. Le bassin sédimentaire mauritanien, où est inféodée le bassin de la Casamance, a connu une grande évolution au cours de l’histoire ;

ceci explique les mutations que l'on observe dans les différents compartiments morphologiques des bassins adjacents. Les phénomènes de transgression et de régression du Nouakchottien, dernièrement notés à l'échelle géologique, ont apporté dans son courant des dépôts sur les versants du bassin de la Casamance et créèrent de nouvelles formations sur les rives du fleuve. Actuellement, le bassin repose sur des formations des plateaux, des buttes résiduelles, des terrasses colluviaux-alluviales, et vasières anciennes (carte 12). Sur les lits des vallées, se trouvent des vasières, reliées au fleuve par le cours principal du marigot. On les appelle les « formations de fleuves » qui sont en contact avec le fleuve. Dans ces formations se trouvent, des formations de tannes humides où se développe un couvert végétal aquatique, appelé palétuviers.

Dans le bassin de Djibonker, les formations de vasières occupent 12,3 % de la superficie des unités morpho-pédologiques. 20% sont occupées par les tannes sèches dans les biefs du marigot (carte 12).



Carte 12 : Caractéristiques morpho-pédologiques du bassin versant de Djibonker



Carte 13 : Caractéristiques morpho-pédologiques du bassin versant d'Agnak

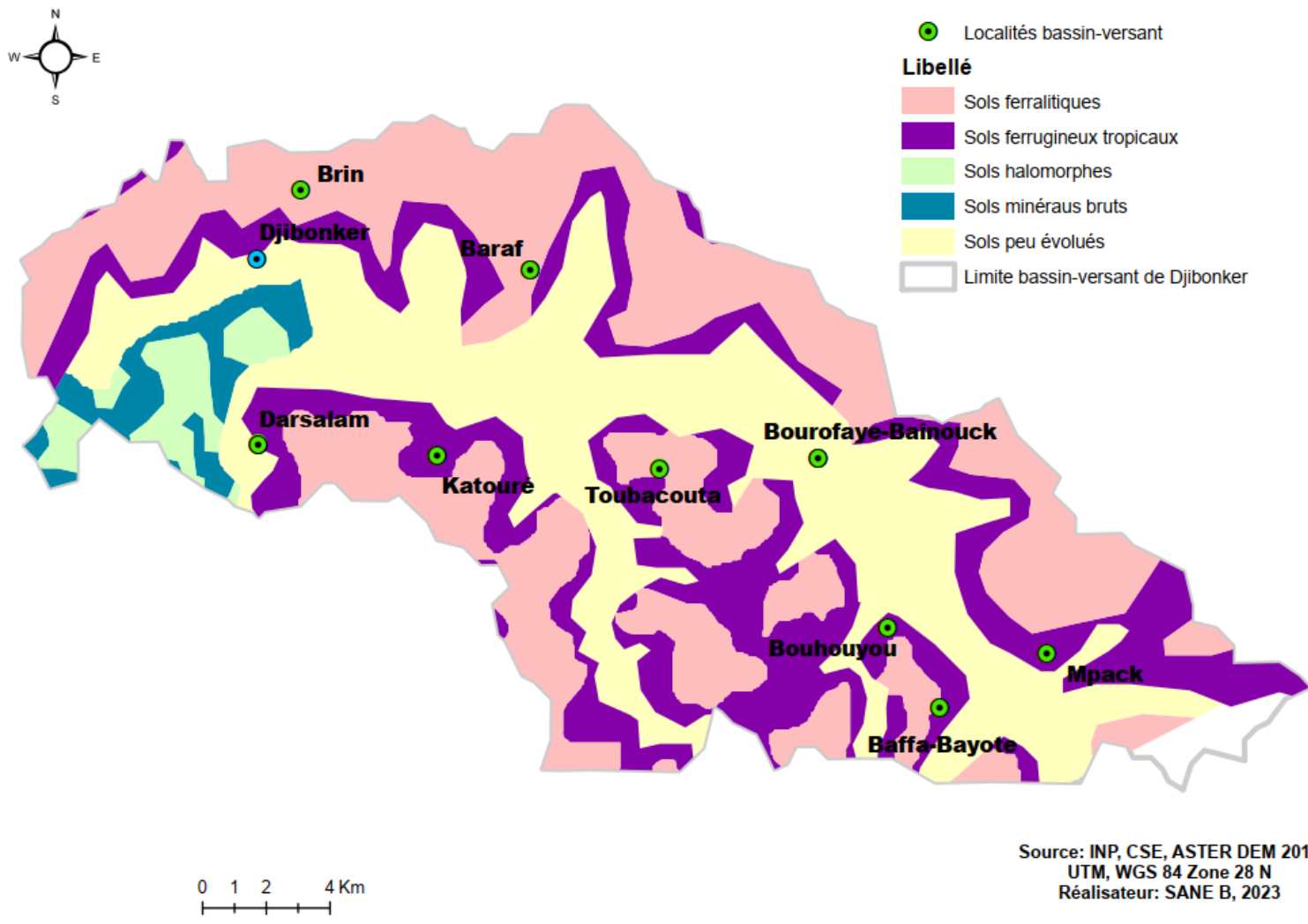
II.5.3. Étude des unités pédologiques, une contribution à la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants

Les différentes unités de sols que l'on rencontre en Casamance ont été étudiées par plusieurs chercheurs et mentionnées dans beaucoup de travaux de la pédogénèse. Ce travail apporte des informations complémentaires à partir des travaux réalisés par l'Institut National de Pédologie en collaboration avec l'USAID. Il faut préciser que les sols ont beaucoup évolué en fonction des différentes unités physiques du milieu. Actuellement en Casamance, les impacts de la variabilité hydro-climatique ont beaucoup façonné les composantes physico-chimiques des sols. Dans l'ensemble, nous avons trois grandes unités de sols au niveau des deux bassins. Il s'agit des sols hydromorphes, des sols halomorphes et de sols ferrallitiques. La plupart des sols hydromorphes, avec leurs caractères peu évolués, sont identifiés au niveau des vallées, zones destinées à la riziculture de bas-fonds. Ces sols jalonnent les vallées de la Casamance dans leurs parties non influencées par la marée. Ce sont des sols de couleur noire souvent appelés sols *diors ou sols « deck dior »* (Dacosta, 1989). Ces vallées sont occupées par des rizières aménagées sous forme de parcelles entièrement endiguées. Ces sols sont donc localisés au niveau des grandes vallées à potentialité rizicole des bassins d'Agnak et Djibonker. A Djibonker, les grandes vallées de Kassana, Katouré et Binako se trouvent sur ce substrat pédologique (carte 14). D'ailleurs, l'importance de l'apport de l'eau de pluie sur son fonctionnement a occasionné l'aménagement d'ouvrages de retenue d'eau en aval de la limite de l'influence de l'apport marine. De même qu'à Agnak, dans la zone de rizières, il est observé un développement important des activités rizicoles.

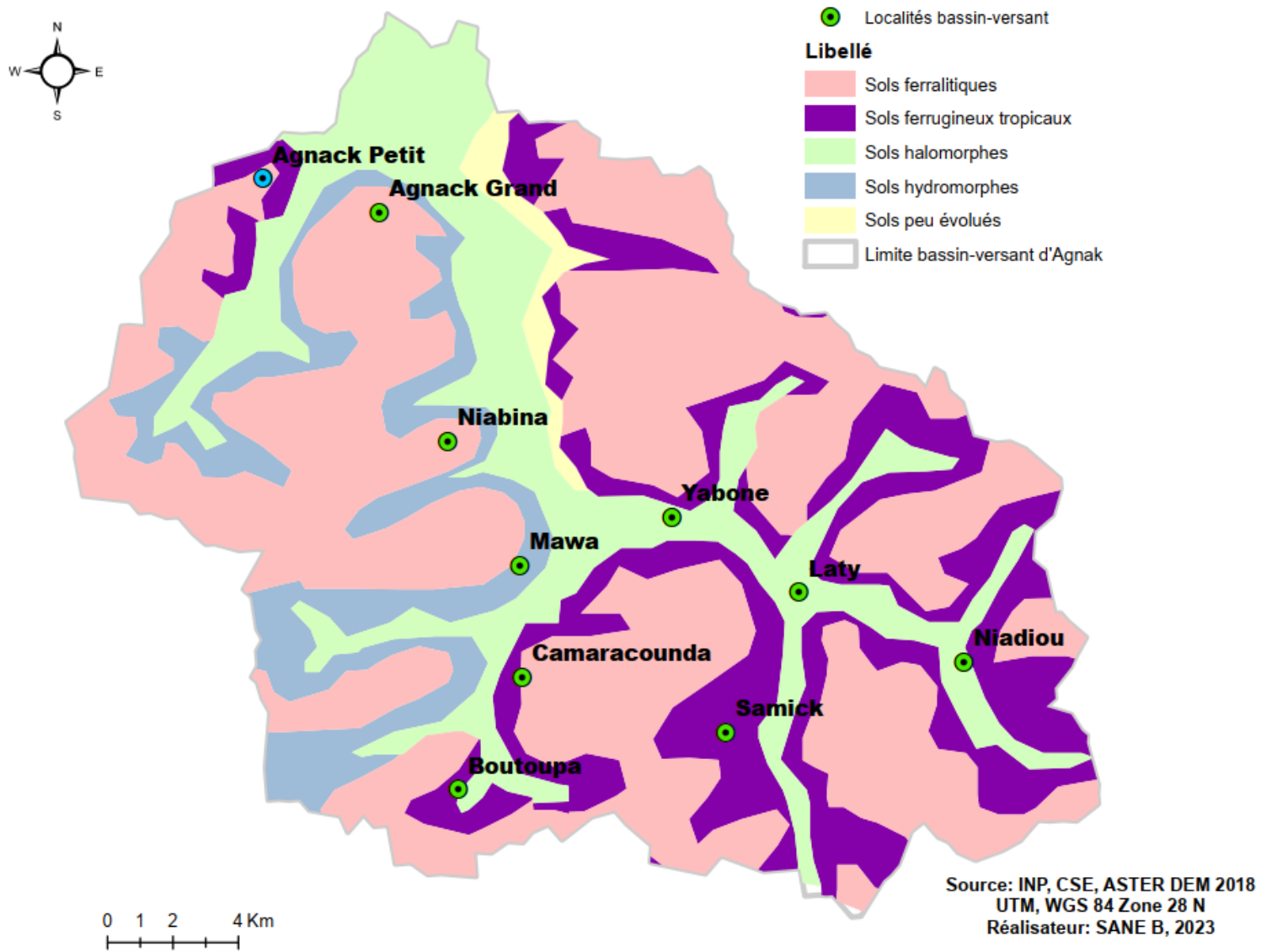
Par contre, les sols halomorphes, avec leurs caractères salins, sont identifiés au niveau des anciennes vasières partiellement dénudées. Ce sont des sols non lessivés, potentiellement sulfatés acides qui ont accumulés une importante quantité de sels en surface. Dans cette partie de nos bassins, se développent des galeries de palétuviers de type *Rhizophora mangle* et *Avicennia africana*. Nous avons aussi les sols hydromorphes à Gley salé qui sont localisés en arrière-plan des vasières. Ils sont moins influencés par l'apport fluvio-marin comparé aux sols halomorphes. On les retrouve uniquement dans le bassin d'Agnak (carte 15). De couleur gris-noire associée aux matériaux détritiques issus de l'apport fluvial, les sols hydromorphes à Gley salé restent entièrement humides pendant toute l'année. Ces sols se

sont formés sur des terrasses sableuses à faible pente formées par le démantèlement de la terrasse supérieure (Vieillefon, 1970).

Les sols ferrallitiques constituent la dernière unité identifiée dans la zone. On trouve ce type de sols au niveau des zones de plateaux où se développent les cultures de rente. Ces sols tropicaux lessivés sont riches en fer et sont très propices à l'agriculture sous pluie. Ils occupent la plus grande partie des terres des deux bassins. Les parties orientale et occidentale des bassins regroupent également les zones d'habitats, de vergers et où se pratiquent d'autres activités liées à la terre. Au niveau du plateau de Brin (carte 14), nous avons ce type de sols sur lequel se pratique une arboriculture fruitière et où se trouve également la palmeraie. Également, dans les terroirs de Camaracounda, d'Agnak-Grand et d'Agnak-Petit se développent d'importantes plantations d'agrumes et d'anacardiens sur un plateau d'environ 20 m altitude.



Carte 14 : Les types de sols dans le bassin de Djibonker



Carte 15 : Les types de sols dans le bassin d'Agnak

II.6. Les caractéristiques de la végétation de la zone d'étude

La végétation constitue, avec le relief, un des éléments les plus déterminants des paysages du fait de son immobilisme apparent et de son action sur les facteurs physico-climatiques dont elle procède par ailleurs. La végétation joue un grand rôle dans l'infiltration ; elle retient la lame d'eau précipitée en diminuant la vitesse du ruissellement et peut donc modifier le débit et le régime hydrologique (Amoussou, 2010). C'est aussi, avec le relief, un des facteurs les plus importants du régime des cours d'eau, d'où l'importance qu'elle revêt dans la compréhension des mécanismes hydrologiques d'un bassin versant (Dacosta, 1989). De plus, elle va réduire l'énergie du ruissellement en constituant un écran à la surface des sols, barrant le cheminement des filets d'eau, abaissant la vitesse d'écoulement, favorisant ainsi l'infiltration (Gal, 2016). Dans les bassins de Djibonker et d'Agnak, le complexe géologique et les divers sols formés ont entraîné différents types de groupements végétaux. On distingue particulièrement deux groupements forestiers :

- ✚ une savane boisée dans la partie orientale du bassin d'Agnak (forêt de Bissine) et la partie méridionale du bassin de Djibonker (forêt Bayotte) qui dispose d'une belle formation de végétation ;
- ✚ une savane arborée couvrant la majeure partie du bassin, composée d'*Adonsonia digitata* (baobab), d'*Eleasis guineensis* (palmier à huile), de *Borassus aethiopum* (ronier) et de *Parkia biglobosa* (néré). Ces différentes espèces sont le plus souvent identifiées au niveau des parties est et nord-est du bassin de Djibonker. On retrouve également ces espèces végétales dans la forêt de Bissine (Agnak).

Les berges des marigots sont peuplées de minces galeries forestières (formations de mangroves) entretenues par une humidité qui les protège contre le sapement au moment des crues (photo 5). Dans cette partie s'est développée de timides formations de mangroves constituées en partie de *Rhizophora*. Au niveau des plateaux, se trouve une végétation ligneuse composée en partie d'anacardiens. Sur les pentes, la densité des espèces décroît du haut vers le bas. Au niveau du versant est du bassin de Djibonker, la végétation est clairsemée. Elle est dominée par des espèces de "nouvelle" économie, parmi elles, nous avons l'anacardier et les agrumes. La savane est parsemée de végétation herbacée avec des espèces comme la combrétacée, etc. Au niveau du versant ouest, on observe une végétation faiblement arborée parsemée d'anacardiens, de manguiers et d'agrumes.

Dans l'ensemble, deux grandes zones s'individualisent dans le bassin : au nord-est une savane arborée qui a été fortement dégradée par la coupe abusive du bois et les feux occasionnés, et à l'ouest une forêt presque en régression au profit des terres de cultures de rente.



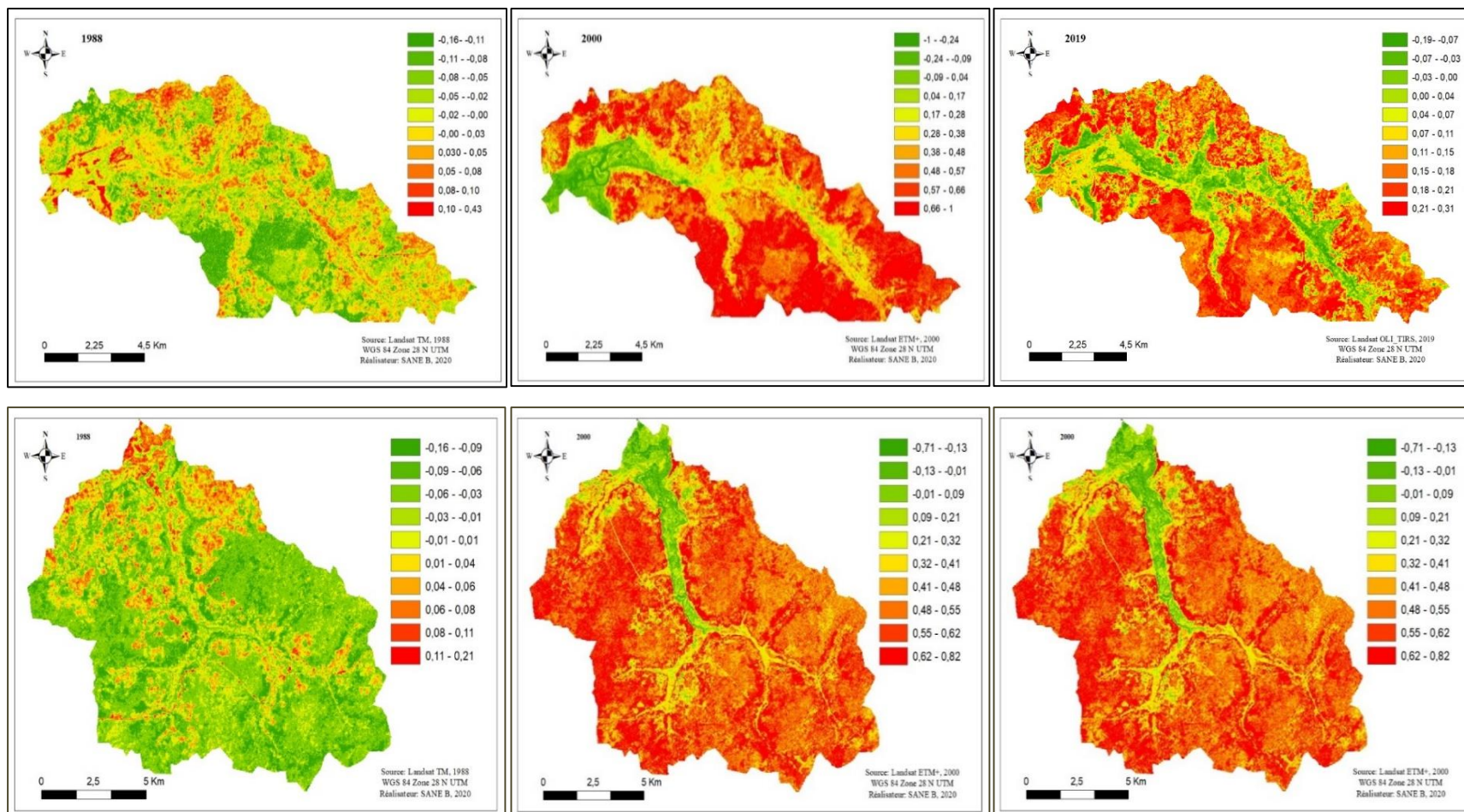
Photo 5: (A) Formations d'*Adonsonia* et (B), mince galerie de palétuviers aux abords du marigot de Djibonker (janvier, 2022)

II.6.1. Evolution du couvert végétal dans les bassins versants étudiés

Les valeurs des images NDVI de la série temporelle de 1988 à 2019 montre une importante dynamique du couvert végétal. Les activités chlorophylliennes des indices de végétation de 1988 et 2000 ont atteint les maxima les plus importants (0,43 et 1). En 1988, les valeurs des NDVI sont presque tous positives dans les bassins étudiés. Cette période coïncide avec le retour de la pluviométrie à la situation normale en Basse-Casamance. Par contre, la spécificité de ce bassin est que l'occupation anthropique n'était pas aussi importante avant les années 1990. De ce fait, la forte activité chlorophyllienne observée sur les autres séries explique en partie le développement des activités agricoles dans la zone. Ces activités sont surtout observées dans la partie sud-est et sud-ouest. Toutefois, il faut noter qu'une régression de l'activité chlorophyllienne est notée en 2000 et 2019. En effet, en 2000, nous observons une activité maximale de 1 tandis qu'en 2019 la valeur maximale de NDVI est de 0,31. Elle se traduit par une régression de la végétation arborée entre ces deux années au détriment des occupations humaines. Les réflectances faibles indiquent qu'il existe présentement dans la zone une galerie forestière bien développée par les plantations d'agrumes et d'anacardiens.

Dans le bassin d'Agnak, les valeurs de NDVI évoluent entre 1988 et 2019. La série temporelle montre des activités chlorophylliennes maximales de 0,82 en 2000. L'année 1988 est caractérisée par (5) classes positives avec un maximum de 0,21 (carte 16). Les parties méridionale et occidentale du bassin ont développé des activités chlorophylliennes les plus fortes. Les populations y ont aménagé des vergers d'anacardiens au détriment des cultures vivrières. Ce changement de pratiques culturelles est dû à la variabilité hydro-climatique et ses corollaires (salinisation des terres rizicoles). En 2000, malgré l'instabilité qui sévissait dans plusieurs localités et l'abandon de quelques vergers par leurs propriétaires, le cycle végétatif continuait de se développer. Les activités chlorophylliennes ont pris une dynamique forte avec un maximum de 1. Pendant cette période, cinq (5) classes de valeurs des NDVI sont presque proches de 1 indiquant une forte activité chlorophyllienne (végétation relativement dense). Ces fortes réflectances sont aussi confortées par les fortes quantités de précipitations enregistrées dans toute l'étendue du grand bassin de la Casamance. En 2019, l'activité chlorophyllienne a continué sa dynamique temporelle positive dans le bassin. On observe durant cette année sept (7) classes de NDVI positives. La classe maximale observée est égale à 0,39 (carte 16).

En sommes, nous pouvons retenir qu'au niveau des deux bassins d'étude, le recouvrement végétal était très faible en 1988, notamment une présence importante de classes faibles qui peuvent correspondre aux sols nus et à l'eau. En 2000, nous observons à Djibonker et Agnak presque la même situation qui consiste en une augmentation d'intensité de l'activité chlorophyllienne. La moyenne de l'essentiel des valeurs NDVI montre des activités chlorophylliennes positives pendant cette période. Par ailleurs, quelques classes faibles ont été identifiées correspondant aux sols nus et aux cours d'eau. Enfin en 2019, les valeurs des NDVI, des deux bassins associés, regroupent 14/20 classes positives. Par ailleurs, il faut observer qu'on a des indices faibles et plus proches de 0 dans l'ensemble des deux bassins (carte 16).



Carte 16 : Evolution du NDVI de 1988 à 2019 à Djibonker et Agnak

Conclusion du chapitre II

Les bassins versants de Djibonker et Agnak reposent sur un relief relativement faible avec des altitudes en moyenne de 20 m. Ces réalités orographiques sont globalement constituées de pentes aux valeurs relativement faibles qui favorisent en partie une faible infiltration et un faible ruissellement dans les différentes parties des bassins versants. Le chevelu hydrographique déterminé dans ce chapitre est constitué d'une diversité de chenaux qui alimentent et façonnent la morphologie des unités de relief présentes.

Les bassins versants se trouvent dans les zones alluviale et fluvio-marine du bassin de la Casamance. Les études hydro-géologiques indiquent que le bassin de la Casamance est façonné en partie par un dépôt important de matériaux détritiques issus de la transgression marine. Ces dépôts indiquent une morpho-pédologie constituée de vallons, de matériaux colluvio-alluviaux, et de buttes résiduelles dans les bassins d'étude.

Les formations végétales de la zone d'étude ont connu une dynamique régressive entre 1988 et 2019. Quelques indices de végétation élevés ont été observés en 2019 liés en partie au développement des cultures de rente et aux plantations d'anacardiens et d'agrumes dans la zone d'étude.

L'analyse des caractéristiques morphométriques, géologiques, géomorphologiques et végétales concourent à la compréhension des modalités de l'écoulement dans un bassin hydrographique. L'Analyse de la variabilité climatique et des variables hydrologiques est également nécessaire à la compréhension du fonctionnement hydrologique et sédimentaire.

CHAPITRE III : CARACTÉRISATION DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET DES VARIABLES HYDROLOGIQUES

La connaissance du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant nécessite l'analyse des paramètres qui interviennent dans le processus hydrologique à l'image des précipitations, de la température (postes pluviométriques d'Oussouye, de Bignona, de Niaguis, de Nyassia et station synoptique de Ziguinchor) et des variables hydrologiques. Les précipitations constituent un paramètre essentiel de par les totaux journaliers et le volume annuel enregistrés pouvant générer des averses génératrices de crues et de sédiments associés (Guesri, 2021). L'analyse des paramètres climatiques et des variables hydrologiques est faite à travers les méthodes empiriques de Coutagne (1935) et Thornthwaite (1948).

III.1. Méthodologie de traitement des données

En analyse hydrologique, diverses approches ou méthodes de traitement sont utilisées pour analyser la pluviométrie. Dans cette section, nous avons utilisé différentes méthodes de traitement statistique permettant de comprendre l'évolution journalière, mensuelle et annuelle à travers des indices, des tests de statistiques (d'évolution, de rupture et de corrélation, etc.).

III.1.1. La détection des ruptures dans les séries de pluies

Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique d'un instant donné, le plus souvent inconnu (Diouf, 2011). Pour une meilleure appréciation de l'évolution de la pluviométrie sur une échelle donnée, on préfère appliquer les lois statistiques. Ainsi, le traitement et l'analyse ont été faits à l'aide du logiciel xlstat. Ce logiciel regroupe plusieurs tests de vérification des séries de données pluviométriques. Le programme XLSTAT est un logiciel dont l'interface s'appuie entièrement sur Microsoft Excel, tant pour la récupération des données que pour la restitution des résultats (Doukpolo, 2013).

Dans le logiciel, on peut manipuler des tests de corrélation entre les séries de données, calculer la moyenne mobile, les cumuls annuels, faire de tests en Analyse en Composantes Principales (ACP) entre différentes stations, etc. Les données sont manipulées à travers des logiciels de traitements importants accomplis de base solides. L'hétérogénéité des résultats de nos données pluviométriques recueillies auprès des différents postes pluviométriques des

bassins, explique comment elles peuvent constituer un facteur déterminant dans la compréhension du comportement hydrologique des bassins versants.

- **Test de Pettitt**

Le test de Pettitt (1979) examine l'existence d'une rupture à un instant inconnu de la série à partir d'une formulation dérivée de celle du test de Mann-Whitney (Servat *et al.*, 1998). Ce test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne. Si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, il propose une estimation de la date de rupture (Diouf, 2011). Le test de Pettitt (1979) est un test non paramétrique de détection d'une rupture unique à une date inconnue dans les séries pluviométriques et hydrologiques (Karambiri, 2017 ; Faye, 2019). Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Servat *et al.*, 1998 ; Kouassi *et al.*, 2017). Le test de Pettitt permet de souligner un point de changement en vérifiant si les moyennes de deux périodes sont différentes (Sané *et al.*, 2020). En outre, le test permet de conforter la fiabilité des choix des années de ruptures ou de cassures de nos séries de données. C'est un test réputé et robuste, appliqué par Lobes *et al.* (1994) ; Vissin *et al.* (2003) ; Fall (2014) ; Nascimento *et al.* (2015) ; Faye (2019) ; Diémé (2019), Sané *et al.* (2020).

Pour les tests, les paramètres retenus pour les calculs sont : hypothèse alternative $\neq 0$; niveau significativité de 5 % ; nombre de simulations de 10000, avec une durée maximale de 180 secondes (Nascimento *et al.*, 2015).

- **Test de Buishand**

La statistique de Buishand (Buishand, 1982 et 1984) est dérivée d'une formulation originale donnée par Gardner (1969) pour établir un test bilatéral de rupture en moyenne à un instant inconnu. Le test de Buishand est paramétrique, supposant la normalité de la série, non autocorrélation et constance de la variance de part et d'autre du point de rupture éventuel. Ce test est performant pour détecter une rupture en milieu de série ; mais il ne fournit pas d'estimation du point de rupture (Diouf, 2011).

III.1.2. Utilisation du test d'évolution de Mann Kendall

Le test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) a été appliqué pour détecter la tendance au dessèchement ou au mouillage de la zone d'étude sur la base du SPI. Pour déterminer l'ampleur du changement, la méthode de la pente de la Sen (1968),

disponible sur le test de Mann Kendall sur Xlstat, a été appliquée. La robustesse du test a été validée par plusieurs essais de comparaison effectués par Yue *et al.* (2004) ; Faye (2015) ; Nascimento *et al.* (2015) ; Sané *et al.* (2020). Il est appliqué au niveau de significativité de 5 %. Dans ce test, les statistiques suivantes sont générées : la statistique S, le Tau ou coefficient de rang de Kendall ou coefficient des rangs de Kendall et la p-value ou variable réduite (Karambiri, 2017).

En outre, afin de fournir des informations fiables sur les performances de SPI, l'analyse de corrélation de Pearson (r) a été effectuée entre le SPI et les données de GRACE mensuelles. Les coefficients de corrélation ont été calculés pour la saison des pluies (mai à octobre) de 1951 à 2019.

III.1.3. Détermination des indices pluviométriques

L'indice a été mis au point par l'université du Colorado en 1990 (McKee, 1993). Il correspond à la transformation de la série temporelle des précipitations en une distribution normale standardisée de moyenne nulle et d'écart-type unitaire (Nouaceur, 2015). L'ampleur des événements temporels des séries de données appliquées à cet indice a été mesurée en fonction des résultats obtenus et de la nomenclature présentée dans le tableau 13. La méthode a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et celles déficitaires (Kouassi *et al.*, 2010). Plusieurs auteurs ont appliqué l'indice dans le cadre de l'étude des séries temporelles des précipitations à différentes échelles géographiques : Ndong *et al.*, (2015) ; Mendy *et al.*, (2018) ; Sané *et al.*, (2020).

Le SPI est exprimé mathématiquement comme suit :

$$SPI = \frac{(P_i - P_m)}{S}$$

Avec P_i : la pluie du mois ou de l'année i ; P_m : la pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée ; S : l'écart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Tableau 13: Nomenclature de l'indice SPI (MKee, 1993)

Valeurs de l'ISP	Séquences de sécheresses	Valeurs de l'ISP	Séquences humides
SPI < -2,00	Extrêmement sec	2,00 < SPI	Extrêmement humide

-2,00<SPI <-1,50	Sévèrement sec	1,50< SPI <2,00	Sévèrement humide
-1,50<SPI <-1,00	Modérément sec	1,00< SPI <1,50	Modérément humide
-1,00< SPI <0,00	Légèrement sec	0,00< SPI <1,00	Légèrement humide

III.2. Analyse de la tendance de la pluviométrie en Basse-Casamance

Les données utilisées pour l'analyse de la pluviométrie dans le cadre de cette thèse sont obtenues au niveau de l'Agence Nationale de de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) pour les postes pluviométriques de Nyassia et Niaguis. Pour des questions liées à la proximité par rapport aux deux bassins, les deux postes pluviométriques ont été retenus pour faciliter l'analyse tendancielle de la pluviométrie.

De par la qualité et la durée des observations, nous avons utilisé en plus les données de la station de Ziguinchor permettant de déterminer une évolution qualitative des tendances de la pluviométrie en Basse-Casamance, et particulièrement dans notre zone d'étude. La série retenue va de 1951 à 2019 (Ziguinchor), soit 68 années. Les données des postes de Bignona, Oussouye, Nyassia, Niaguis se limitent à 2019, soit 68 années d'observations. La période semble être représentative d'autant plus que les données utilisées par des auteurs comme Faye et Anastasie (2018) dans le bassin de la Gambie ; Kahya and Kalayci (2004) ; Burn and Elnur (2002), sur une échelle temporelle de 60 années les jugent comme représentatives et faciles pour représenter la tendance de la pluviométrie en Basse-Casamance.

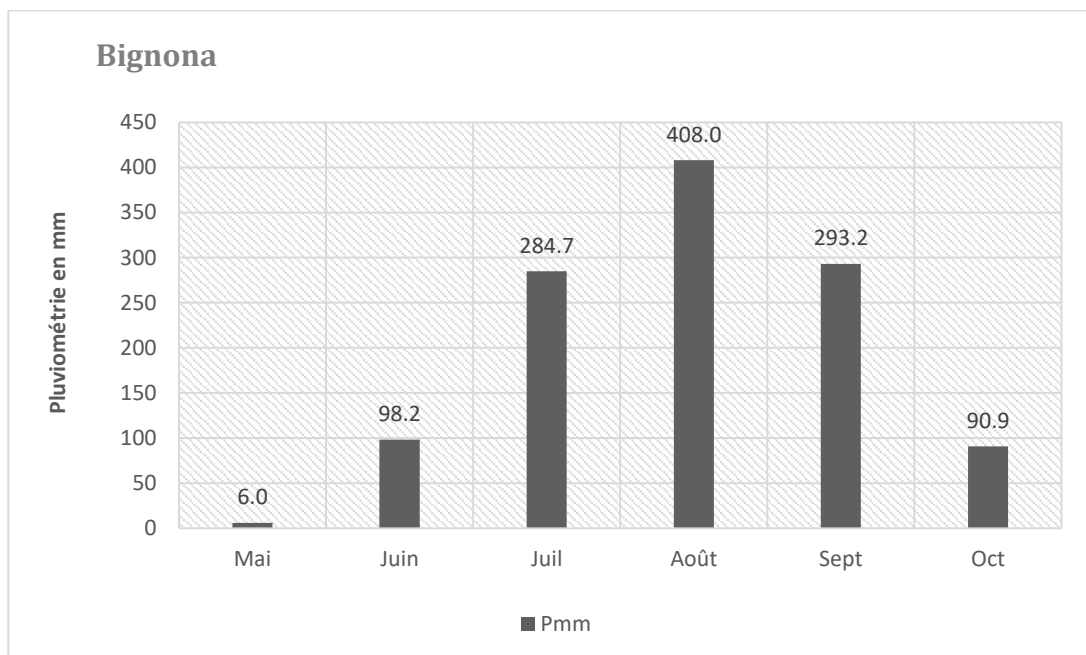
III.2.1. Variabilité mensuelle de la pluviométrie à Oussouye, Ziguinchor et Bignona

La pluviométrie est observée sur une période de soixante-huit ans sur quelques stations de la Basse-Casamance. Il s'agit des stations d'Oussouye, Ziguinchor et Bignona. Les deux postes secondaires (Nyassia et Niaguis), la série obtenue et complète commence à partir de 1981. Cette analyse permet de déterminer l'évolution des quantités de pluies à l'échelle mensuelle.

Nous observons une variabilité des pluies à la Station de Ziguinchor, Oussouye et Bignona sur pratiquement toute la série. Dans nos différentes séries de données, la variation est plus observée au courant des mois de juin et juillet, marquant le début de la saison des pluies pratiquement au sud.

Pendant la saison des pluies, on enregistre d'importants volumes d'eau dans les postes pluviométriques d'Oussouye, Ziguinchor et Bignona. Les mois d'août, septembre et juillet enregistrent pratiquement les totaux de pluies les plus élevés. Cette période correspond à la l'installation de la mousson en Basse-Casamance. A Oussouye, en août, juillet et septembre, il a été enregistré respectivement 453,0 mm ; 335,5 mm et 324,7 mm. A Ziguinchor, (337,5 mm) ; (445,6 mm) et (338,4 mm) sont les totaux pluviométriques enregistrés respectivement en août, septembre et juillet. Le mois d'août est le plus pluvieux à la station de Bignona avec 408 mm (fig.9) soit 36,2 % des précipitations. Le mois de septembre est le deuxième le plus pluvieux à Ziguinchor (338,4 mm) et Bignona (293,2 mm) soit respectivement 25,2 % et 26 % des précipitations tandis qu'à Oussouye, juillet est le deuxième mois le plus pluvieux avec 335,5 mm soit 25,4 % des précipitations (fig.9).

A la station de Bignona, il a été constaté un léger écart comparé aux stations d'Oussouye et de Ziguinchor plus proches du domaine sub-guinéen. Cette disparité à l'échelle mensuelle des quantités de pluies peut s'expliquer par la position géographique de ces stations et par les manifestations spatio-temporelles irrégulières de la mousson.



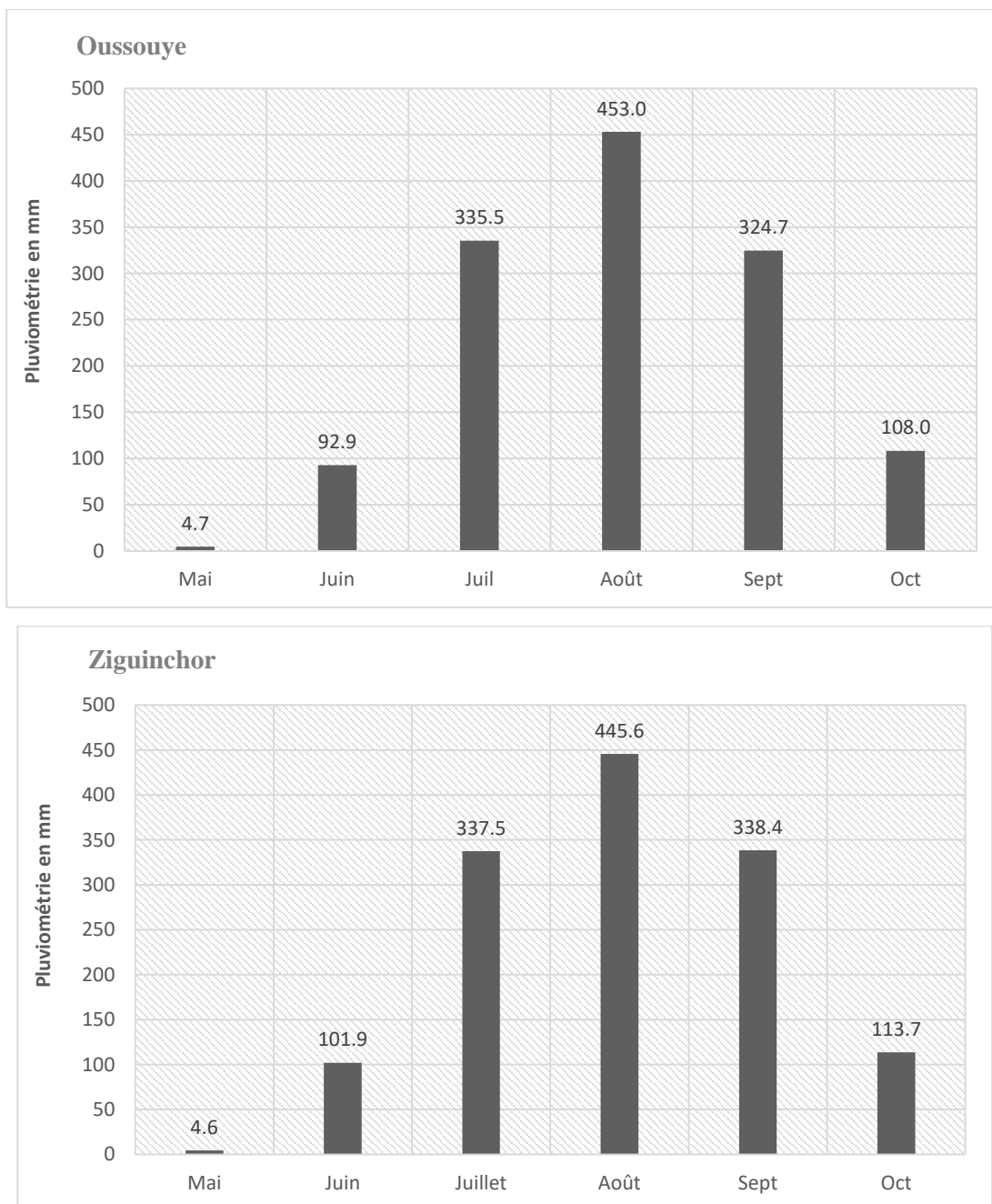


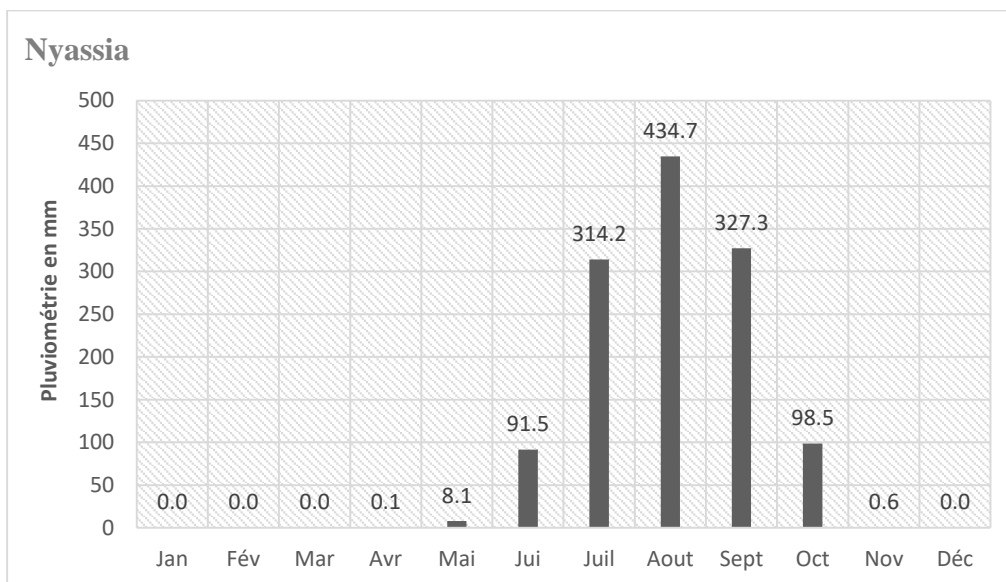
Figure 9 : Evolution des totaux pluviométriques moyens mensuels aux stations de Bignona, Oussouye et Ziguinchor de 1951 à 2019

II.2.2. Répartition mensuelle de la pluviométrie à la station de Nyassia et Niaguis

A Nyassia, on constate une pluviométrie qui s’installe globalement au courant des mois de juillet, août et septembre. Le mois d’août enregistre des quantités de précipitations moyennes de 434,7 mm (fig. 10) soit 34,09 % des précipitations de la saison de pluies de la série 1981-2019. Le mois septembre enregistre 327,3 mm soit 25,67 % des

précipitations. On constate le retrait progressivement entre octobre et novembre, qui enregistrent des pluies moyennes respectives de 98,5 mm et 0,6 mm.

A Niaguis, la saison des pluies s'installe pratiquement en mi-juin et début juillet. Les volumes d'eau précités les plus importants sont observés au mois d'août (32,79 % des précipitations). Il suit le mois de septembre, qui enregistre, 299,5 (fig. 10) mm soit 24,13 % des précipitations mensuelles de la saison. Le mois de juillet enregistre 293,1 mm soit 23,61 % des précipitations. Toutefois, on constate une légère différence de volume d'eau précipitée à l'échelle mensuelle entre les stations de Niaguis et Ziguinchor. Pratiquement dans ces postes pluviométriques qui polarisent nos bassins d'étude, il est observé une forte présence de pluies pendant les mois d'août et septembre. Cette période coïncide au temps de crues des rivières et marigots situés dans la zone d'étude, même s'il est noté par ailleurs quelques variabilités.



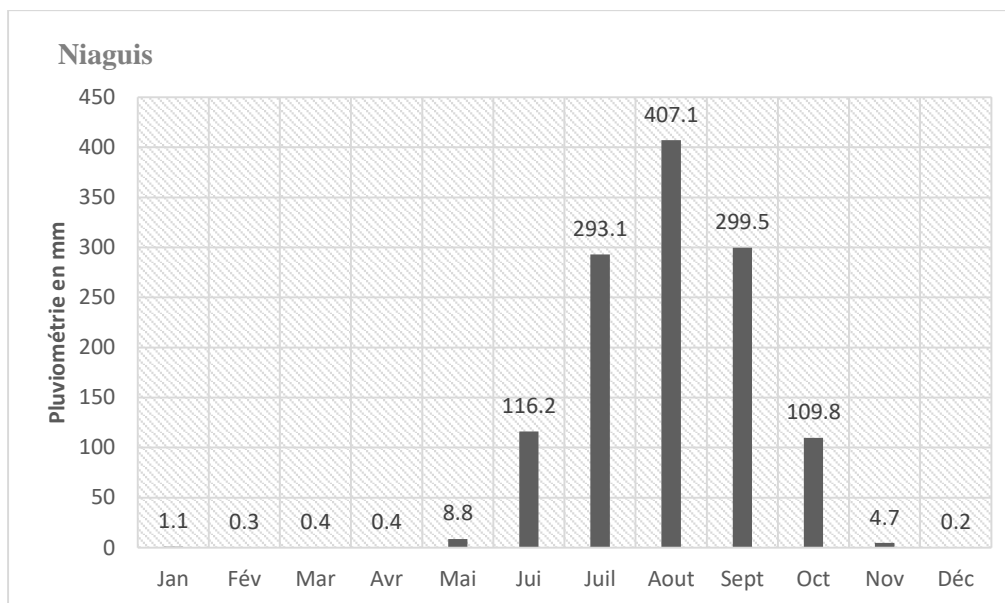


Figure 10 : Evolution des totaux pluviométriques moyens mensuels aux postes de Nyassia et Niaguis de 1981 à 2019

En calculant le coefficient de variation à partir de l'écart-moyen mensuel, une variabilité élevée est observée entre les moyennes mensuelles. La plus importante variation est observée en début de saison des pluies et vers la fin (1,94 et 4,6), et celle plus faible au mois de juillet, août et septembre. Toutefois, les valeurs des coefficients, au mois de juin, sont soit supérieures ou égales à 0,5. Cette variation s'explique par le retard actuel de la saison des pluies en Basse-Casamance. Le tableau 14 indique les écarts mensuels et des coefficients de variation de la pluviométrie à la station de Bignona, Oussouye et Ziguinchor de 1951 à 2019.

Tableau 14: Ecarts-moyens mensuels et variations des cumuls moyens mensuels des précipitations

Bignona												
Mois	J	F	M	Av	M	Ju	Jui	Août	Sept	Oct	No	Déc
Ecart	0,	0,54	0,0	0,12	11,7	56,0	109,7	151,1	104,6	62,6	15,1	272,3
-type	80		7		5	6	6	9	1	5	7	1
Coef.	7,	6,86	4,1	7,57	1,94	0,57	0,39	0,37	0,36	0,69	2,73	3,59
vari	34		8									
Oussouye												

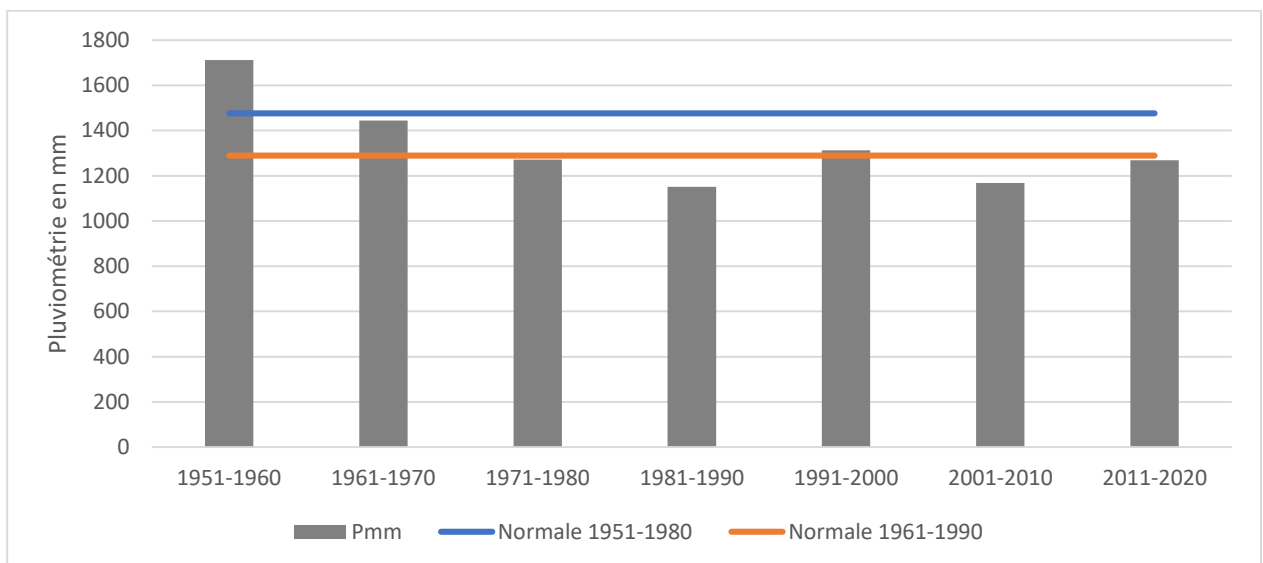
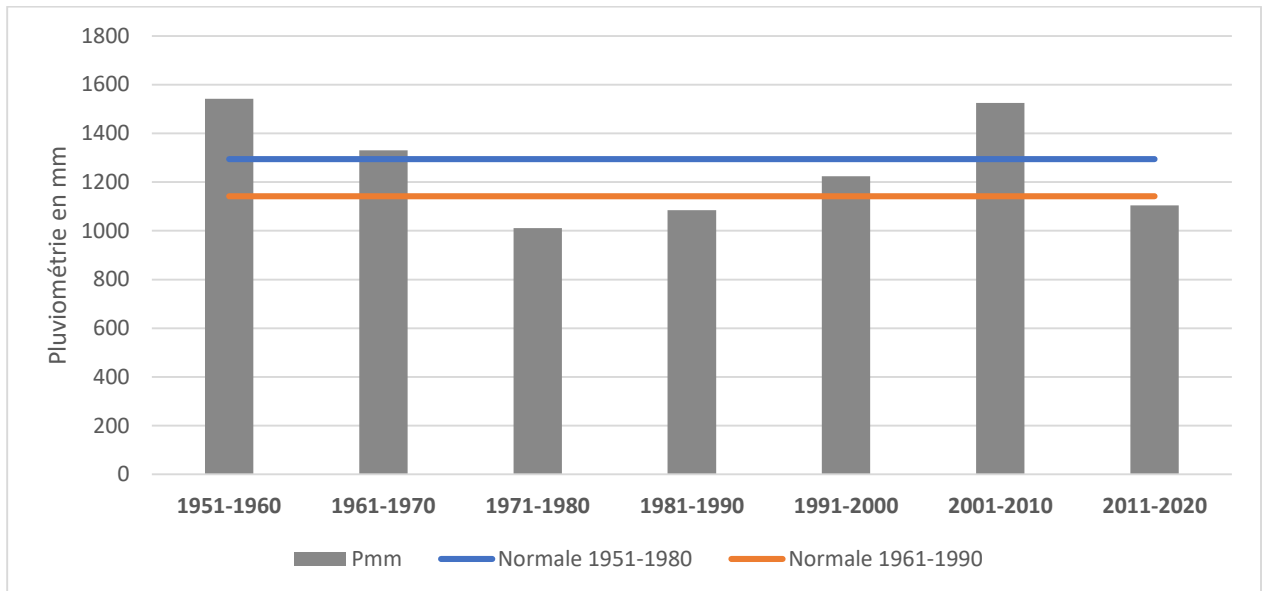
Mois	J	F	M	Av	M	Ju	Jui	Août	Sept	Oct	No	Déc
Ecart -type	1, 37	0,42	3,8 5	8,065	7,74	73,1 2	131,7 0	163,1 8	104,2 4	74,9 9	51,0 9	2,84
Coef. Vari	7,5 2	3,91	8,25	8,25666	1,65	0,79	0,39	0,36	0,32	0,69	3,92	4,00
Ziguinchor												
Mois	J	F	M	Av	M	Ju	Jui	Août	Sept	Oct	No	Déc
Ecart -type	1, 16	0,80	0,1 4	0,02054	7,84	63,3 2	134,2 2	161,2 5	108,3 5	73,5 4	15,3 2	2,07
Coef. var	4, 46	3,38	5,3 3	4,7247	1,70	0,62	0,40	0,36	0,32	0,65	2,14	4,07

Le taux de variation entre les moyennes mensuelles tend à décroître entre les stations d'Oussouye, Ziguinchor et Bignona. Cette répartition inégale de la pluviométrie à l'échelle mensuelle indique une variation considérable au niveau des stations étudiées. Des changements qui peuvent impacter voire influencer la disponibilité de l'eau et retarder le début des activités des populations en grande partie dépendantes de l'agriculture sous pluie.

II.2.3. Evolution de la pluviométrie à l'échelle décennale

Les tendances à l'échelle décennale précisent la variabilité dans les séries des précipitations au niveau de stations retenues. Pratiquement, les moyennes décennales (1951-1960) et (1961-1970) renvoient à une situation humide. Au courant de ces décennies, les précipitations dépassent largement 1300 mm au niveau des stations de Bignona, Oussouye et Ziguinchor. Particulièrement, la décennie (1951-1960) est considérée comme pluvieuse et humide. Les trois (3) stations étudiées ont des moyennes décennales qui dépassent les normales de références 1951-1980 et 1961-1990 (fig.11). La décennie 1961-1970, est moins humide comparée à la normale 1951-1960. Les décennies 1971-1980 et 1981-1990, enregistrent en moyenne des volumes d'eau précipités faible comparée à la normale de référence 1951-1960. La baisse maximale des précipitations est observée à la décennie 1981-1990 dans les stations étudiées. Cette décennie est considérée comme sèche. La reprise des

quantités de précipitations relativement importantes est observée au courant des décennies 1991-2000 et 2001-2010. Contrairement aux deux décennies précédentes, elles sont relativement humides dans les stations de référence. Les écarts de précipitations comparés à la normale de référence (1951-1980) sont compris entre 200 et 250 mm dans toutes les stations (fig.11).



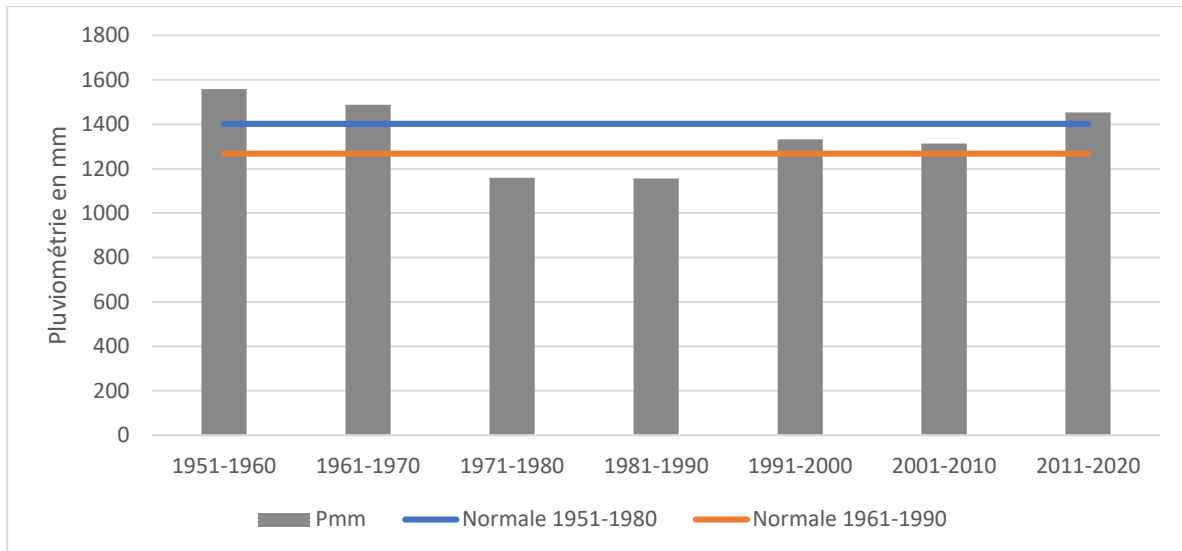


Figure 11: Evolution de la pluviométrie décennale à Bignona, Oussouye et Ziguinchor

III.2.4. Variabilité interannuelle de la pluviométrie à Nyassia et à Niaguis

L'application du test de Buishand a permis de détecter une présence de rupture pluviométrique dans la série de pluies des stations de Nyassia et Niaguis de 1981 à 2019. Celle-ci intervient en 2004 dans les deux stations.

La période avant-rupture (1981-2004), est la période qui enregistre des précipitations relativement faibles. Cette période a une moyenne de 1145,8 mm à Niaguis et 1151,7 à Nyassia (fig.12). Une moyenne relativement faible comparée à la normale humide de 1951-1980 qui est de 1401,76 mm à Ziguinchor.

La période après-rupture de la série traitée, est comprise entre 2004 et 2019 (fig.12). Pendant cette période de légères séquences de reprises de la pluviométrie sont observées en 2015, 2016, 2017 et 2018 dans les deux stations. Cette période a une moyenne de 1371,1 mm à Nyassia et 1366,7 mm à Niaguis, qui est toutefois relativement humide comparée à la période précédente et à la normale (1951-1980) à Ziguinchor.

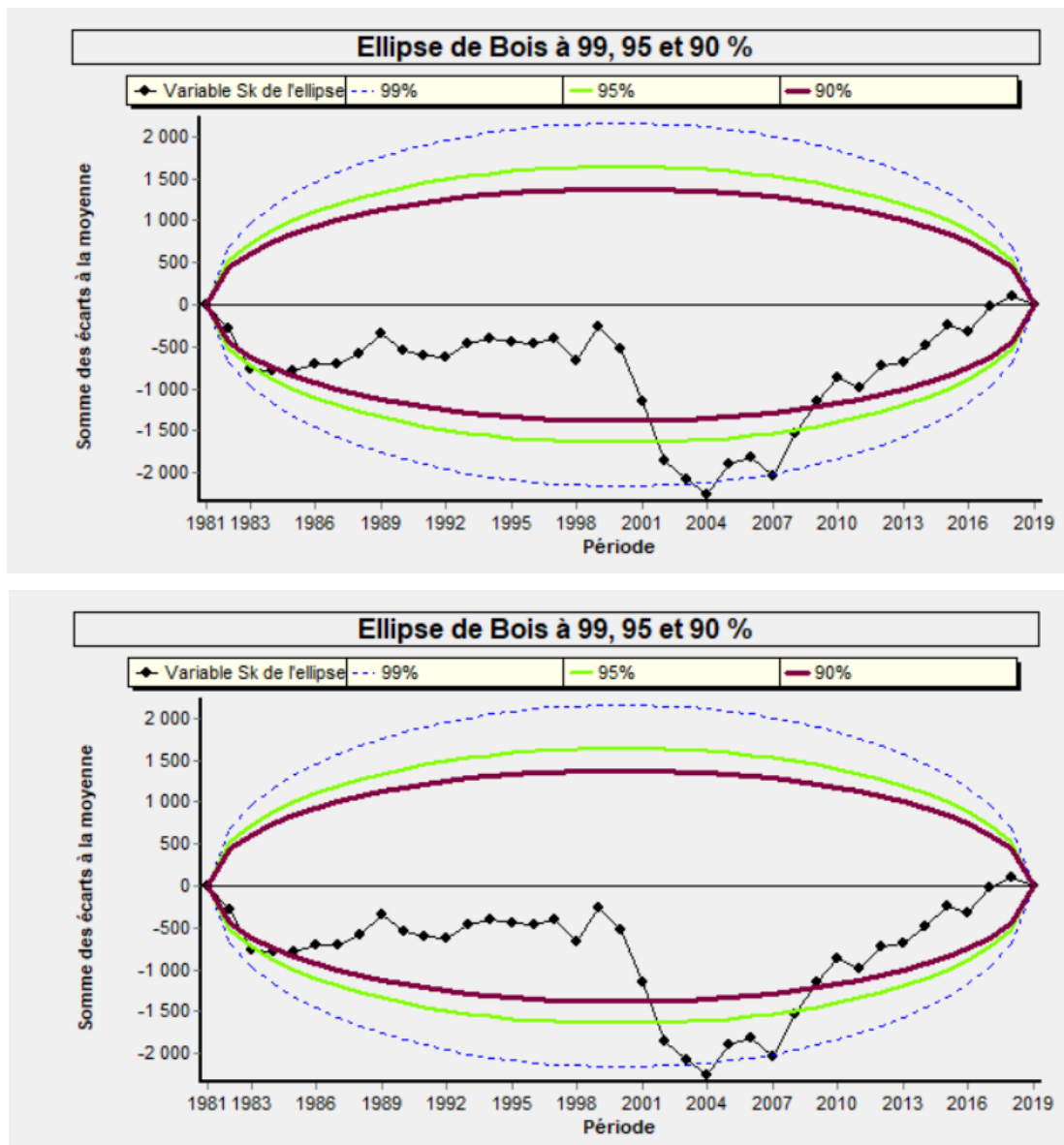


Figure 12 : Mise en évidence de la rupture par le test de Buishand dans les séries pluviométriques des stations de Nyassia et de Niaguis

III.2.5. Variabilité des indices pluviométriques annuels à Ziguinchor, Oussouye et Bignona

Les indices de sécheresse pluviométrique sont utilisés pour caractériser l'évolution de la pluviométrie entre 1968 et 2019 pour les stations retenues. Les excédents constituent les années où les indices sont supérieurs à 0 et le sens inverse pour les déficits. Au niveau des données traitées, on observe une variation importante de 1968 à 2002. L'analyse de ces indices montre dans la globalité une tendance vers une sécheresse pluviométrique, vingt-quatre années humides contre vingt-six sèches. La période 1968-1982 constitue la période

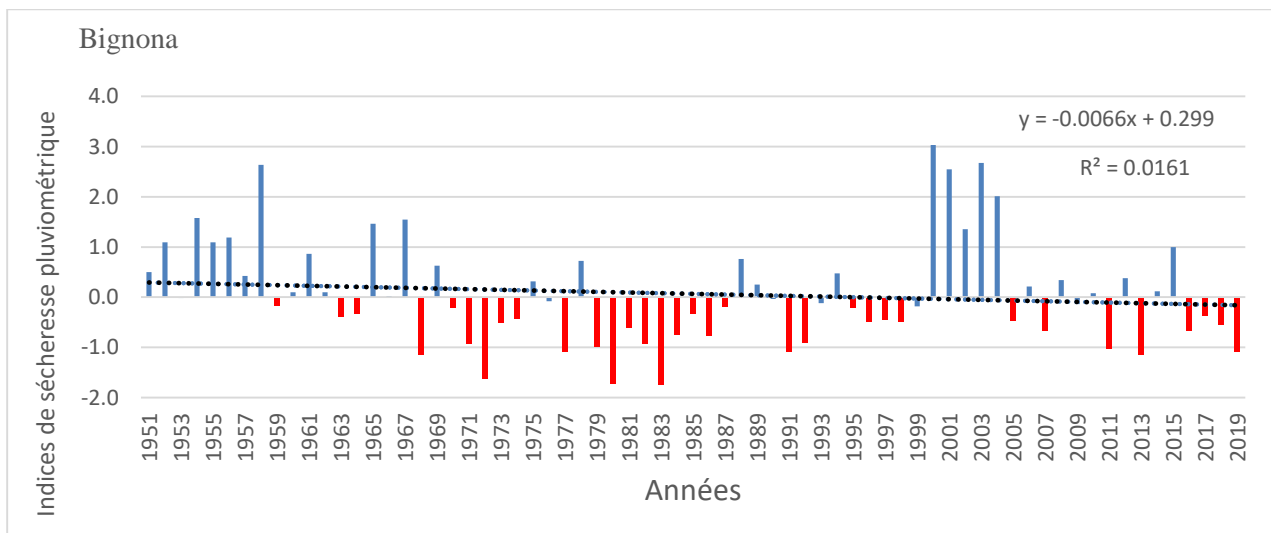
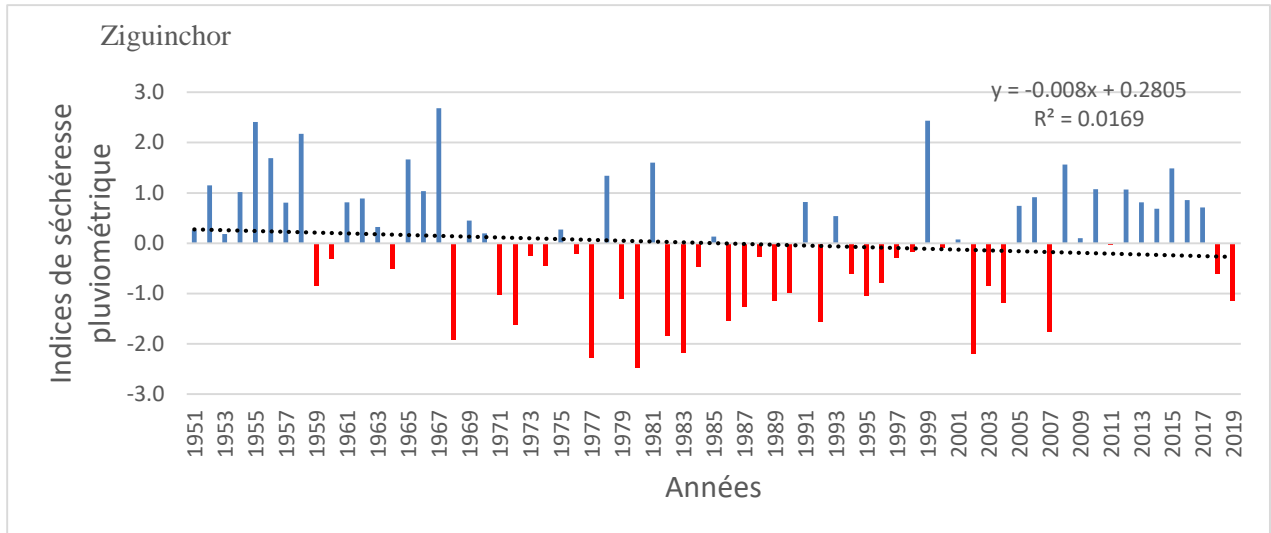
où les déficits chroniques de pluviométrie ont été enregistrés. Nous notons dans la série de données des déficits élevés enregistrés durant l'année 1970, coïncidant avec le début de la sécheresse pour plusieurs stations ouest-africaines. De même, les années 1972, 1980, 1982 et 1983 ont enregistré les indices les plus faibles (fig. 13).

La série étudiée montre que les précipitations connaissent des variabilités en Basse-Casamance depuis le début des années 1970. Au niveau des postes étudiés, le test de Pettitt (1979) indique l'année 1968, comme la date de rupture de la série de précipitations. D'après les résultats du test, deux périodes se dégagent : une période avant rupture et une période après rupture.

Selon Pettitt (1979), la période avant rupture est considérée comme humide ou fortement pluvieuse. Au cours de cette période, les précipitations moyennes annuelles enregistrées sur tous les postes sont comprises entre 1400 et 2000 mm. La hauteur pluviométrique la plus élevée est enregistrée en 1958 (2188,5mm) à Bignona, en 1967 (2006,9 mm) à Ziguinchor et en 1956 (2274,7 mm) à Oussouye. À la station de Ziguinchor, la moyenne avant rupture (1572,1 mm) est largement supérieure à celle de la période après rupture (1291,1mm), soit un écart de 281 mm. La variation est notée aussi au poste d'Oussouye où la période avant rupture (1644,2 mm) est supérieure à celle après rupture (1244,4 mm), soit un déficit de 399,8 mm. Pratiquement la période avant rupture, même si toutefois elle semble être trop courte (16 années) détient les cumuls moyens pluviométriques les plus élevés, d'où son caractère humide.

La période après rupture (1968-2019) est faiblement pluvieuse. Durant cette période, de faibles quantités de pluies par rapport à la période avant rupture sont enregistrées sur tous les postes. La moyenne des précipitations est de 1291,1mm (Ziguinchor), 1244,4 mm (Oussouye) et 1200,6 mm (Bignona). Les précipitations n'ont cessé de varier à l'échelle annuelle depuis cette cassure. Une chronique de la quantité moyenne de la pluviométrie s'est installée en Basse Casamance. Les baisses des hauteurs pluviométriques les plus marquantes ont été notées en 1972 (655,5 mm), 1980 (618,7 mm) et 1983 (612,6 mm) au poste de Bignona. Au poste de Ziguinchor, le déficit est plus senti durant les saisons des pluies de 1968, 1977, 1980, 1983 et 2002, où respectivement les totaux 882,5 ; 790,3 ; 745,6 ; 817,9 ; 811,7 mm ont été enregistrés.

Cette variabilité de la pluviométrie concerne l'ensemble de la Casamance. Elle est en phase avec les périodes où la sécheresse s'est manifestée en Basse-Casamance occasionnant un changement abrupt des régimes d'écoulement des cours d'eau (Dacosta, 1989). Ainsi, en affectant le cycle interannuel, des conséquences sont perceptibles sur le comportement hydrologique des bassins, entièrement dépendante de la pluviométrie.



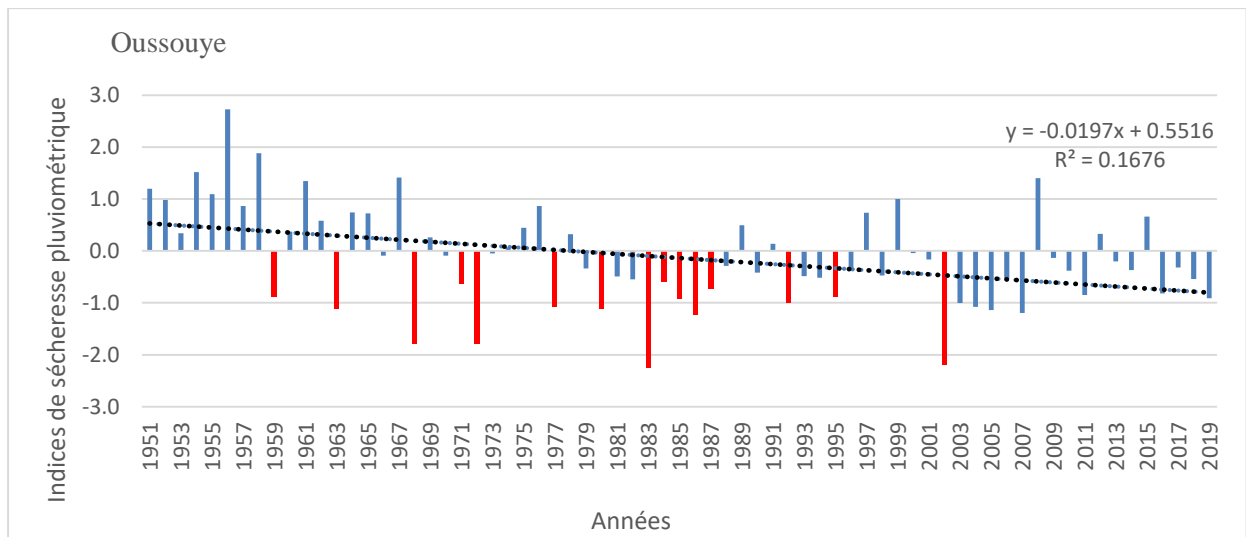


Figure 13: Indices pluviométriques de 1951 à 2019 à Ziguinchor, Bignona, Oussouye

III.2.6. Variabilité des indices pluviométriques à Niaguis et Nyassia

La figure 14 indique trois périodes dans la série des indices pluviométriques dans les deux stations.

A la station de Nyassia, les trois périodes obtenues après la segmentation de Hubert sont : 1981 à 1999 ; 2000-2004 et 2005 à 2019. Les deux premières périodes sont relativement sèches trois années de sécheresse extrêmes à savoir 1983, 1985 et 1986. La période 2000-2004 est également sèche avec des indices de sécheresse comprise entre -2 et -3 (fig.14). La dernière est relativement humide et compte 15/19 années humides. Les années 2014 et 2015 sont considérées comme les plus humides avec des indices de 1,6 et 2 (fig.14)

A la station de Niaguis, les trois périodes sont : 1981-1998 ; 1999-2003 et 2004-2019. La première période est relativement sèche avec trois années de chroniques pluviométriques (1983, 1985 et 1986). La seconde période (1999-2003) est également relativement sèche. Toutefois, on note au courant de cette période de petites séquences humides en 1999 et 2001(fig.14). La troisième période 2004-2019, est mieux arrosée par les précipitations. Elle a enregistré plus d'années humides.

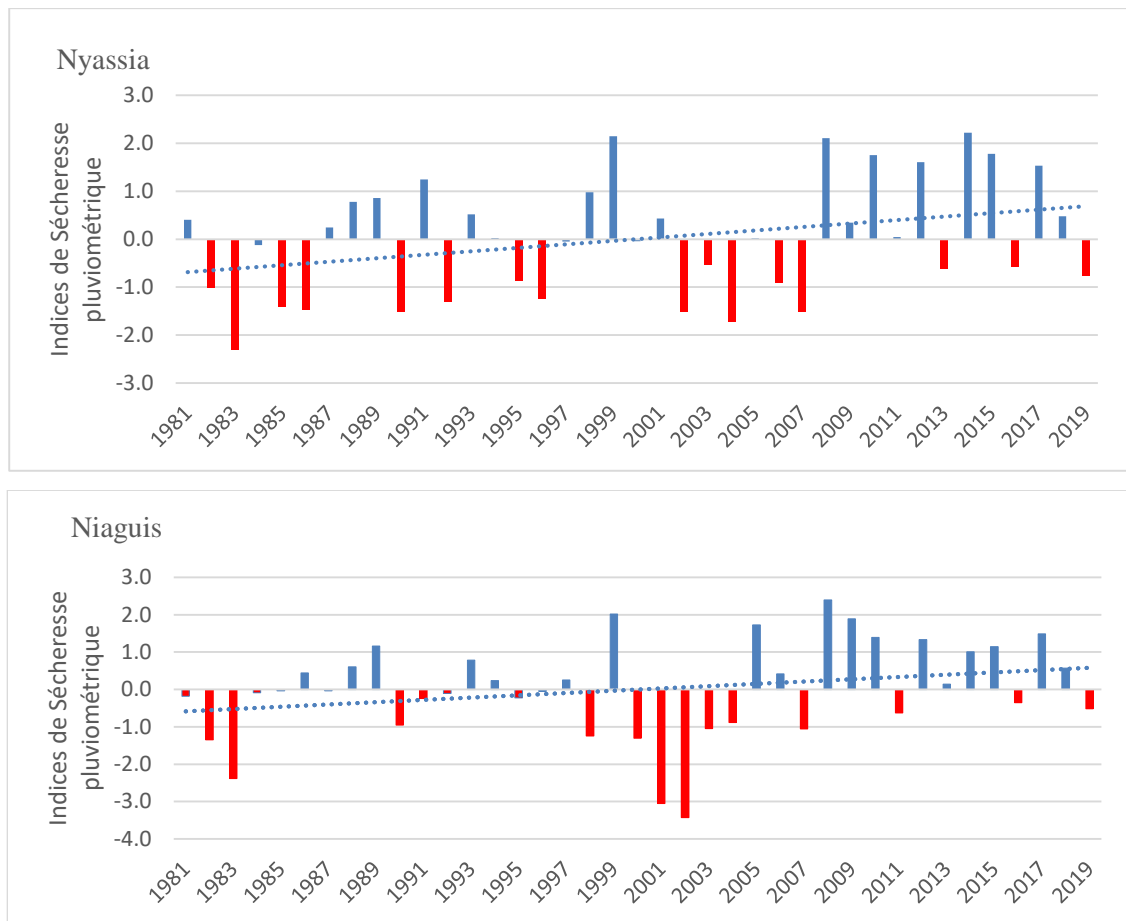


Figure 14 : Indices pluviométriques à Nyassia et Niaguis de 1981 à 2019

III.2.7. Variabilité spatio-temporelle sur la base des normales

Nous avons travaillé sur quatre normales pluviométriques à savoir la normale 1951-1980 ; 1961-1990 ; 1971-2000 et 1981-2010. La méthode du krigeage a été appliquée dans cette analyse. Elle consiste à générer la pluie à l'échelle spatio-temporelle sur un territoire ou un espace paramétré manuellement. Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure spatiale propre à la variable estimée (Diouf, 2011). Nous avons appliqué cette méthode vue qu'aucun poste ou station pluviométrie n'est disponible sur l'étendue des bassins. La méthode a été appliquée par Thauvin, (1992). Les données obtenues indiquent que la normale 1951-1980 est la plus humide dans toutes les stations étudiées (carte 17). Elle est plus humide aux stations d'Oussouye et Bignona.

A la normale (1951-1980), une forte présence de l'isohyète 1400mm est notée sur l'étendue de la Basse-Casamance. Pendant cette période, les normales pluviométriques étaient

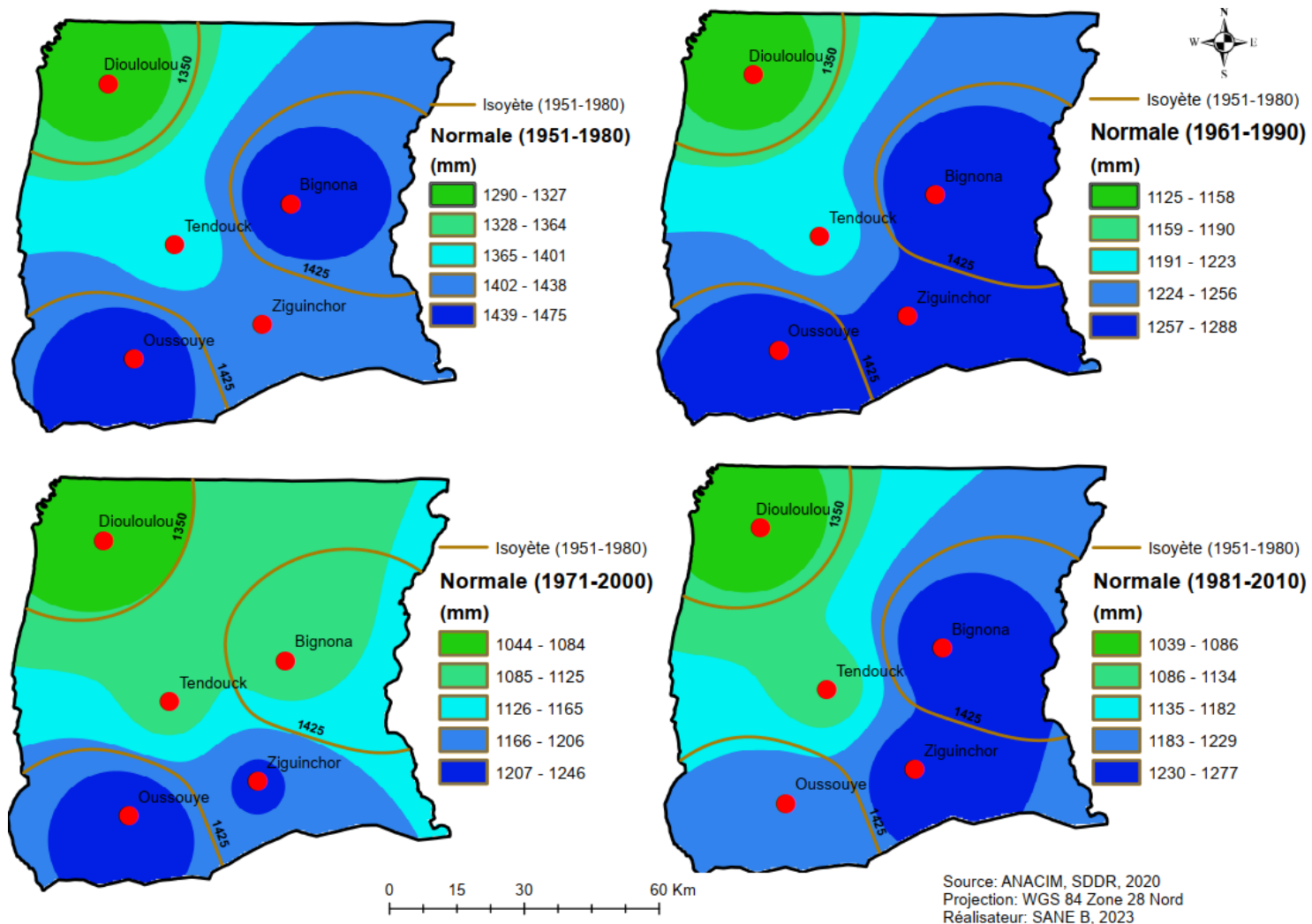
respectivement de 1475,88 mm à Oussouye, 1401,76 mm à Ziguinchor et 1294,37mm à Bignona. De ce fait, plusieurs localités de la Basse-Casamance étaient relativement humides.

A la normale (1961-1990), les précipitations étaient relativement faibles, et la partie nord de la Basse-Casamance était plus concernée par ce rétrécissement de l'isohyète humide (1951-1980). Toutefois, les stations d'Oussouye et Ziguinchor, ont enregistré respectivement des normales pluviométriques modérément humides de 1288,9 mm et 1267,4 mm (carte 17).

A la normale (1971-2000), relativement sèche, les précipitations ont considérablement baissé. Elle se manifeste par un retrait de l'isohyète humide (1951-1980) vers la partie méridionale de la Basse-Casamance. Par conséquent, les normales pluviométriques de toutes stations étudiées sont inférieures à la normale humide de la série (1951-1980).

La dernière normale de la série (1981-2010), est faiblement humide comparée à la normale 1971-2000. Les stations situées plus au sud et au sud-est de la Basse-Casamance à savoir Oussouye, Ziguinchor et Bignona, ont enregistré des précipitations plus importantes, et indiquent de ce fait, une situation modérément humide.

Au regard de l'évolution des normales pluviométriques dans les stations étudiées, on peut retenir que les normales 1961-1990 et 1971-2000 ont été plus affectées par la sécheresse en Basse-Casamance. Toutefois, la dernière normale de la série (1981-2010) semble être relativement humide comparée aux deux précédentes. Cette analyse de la pluviométrie par le système d'interpolation permet de situer les bassins dans leur contexte spatio-temporel. A cet égard, les résultats du krigeage ou interpolation ont montré l'hétérogénéité de la répartition spatio-temporelle de la pluviométrie sur la Basse-Casamance. Cette distribution confirme ainsi, l'analyse de Nouaceur et Laignel, 2015 qui stipule que l'évolution de la pluviométrie mondiale est beaucoup plus contrastée, puisqu'elle est soumise à une forte variabilité spatio-temporelle.



Carte 17 : Distribution spatiale des précipitations et migration des isohyètes en Basse-Casamance de 1951 à 2019 par rapport aux normales retenues.

III.3. L'évolution des conditions thermiques en Basse-Casamance

Pour caractériser la situation thermique en Basse-Casamance méridionale, nous avons utilisé les données de la station synoptique de Ziguinchor. Ces données semblent être représentatives pour une bonne lecture des températures minimales, maximales et moyennes à Ziguinchor. C'est la seule station proche de nos bassins d'étude à disposer de données de température sur une longue série. Toutefois, il faut préciser qu'elles peuvent ne pas refléter exactement la réalité, à une échelle plus fine. La température est un facteur important pour son influence sur l'évaporation et l'évapotranspiration, mais celle-ci sera surtout conditionnée par la disponibilité de la ressource en eau (Diouf, 2011).

III.3.1. Évolution des températures mensuelles de 1960 à 2019

Les températures moyennes faibles minimales sont enregistrées au mois de décembre, janvier et février. Les plus faibles valeurs sont notées aux mois de janvier (16,7°C), décembre, (17,6°C) et février (17,7°C). Les valeurs thermiques les plus élevées sont enregistrées aux mois de mars, avril et mai. Ce sont des mois pendant lesquels, une forte sensation de chaleur se précise, et la température oscille entre 34,7°C et 37,8°C en avril (fig.15). Ainsi, il faut dire qu'au sud du pays, la situation thermique de ces dernières années a connu d'importants changements. Elle se manifeste par des variations de chaleur et de fraîcheur à l'échelle mensuelle.

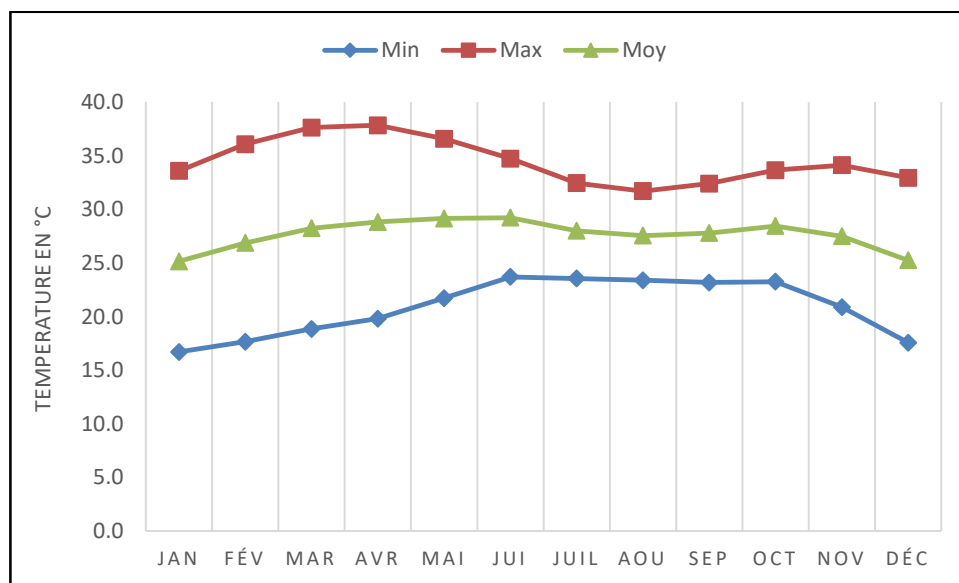


Figure 15: Variations des températures moyennes mensuelles de 1960 à 2019 à Ziguinchor

Les résultats du test sur les températures précisent la tendance ascendante de la température de 1960 à 2019. Dans la série de données traitées, les températures annuelles les plus faibles ont été ressenties dans la zone en 1960 avec 26, 12°C (température moyenne) ; 32, 9°C pour (la température maximale) et 19°C pour la température minimale. Les températures maximales observées en 2019 sont de 37,9°C, celles minimales de 22,53°C et celles moyennes de 29,9°C.

Au cours des trois dernières décennies, la température enregistrée à la station connaît une hausse statistiquement significative sur tous les mois à un niveau de confiance de 95 %. La hausse est plus sentie pendant les mois de juin (0,621°C), juillet (0,610°C) et septembre (0,634°C). On note une évolution au courant des mois de mai (0,455°C par an), août (0,587°C par an) et octobre (0,575°C par an). Toutefois, la hausse n'est pas très significativement importante pendant les mois de janvier (0,267) et février (0,289) à la station de Ziguinchor de la période 1960 à 2019 (tableau 15).

Tableau 15: Tendence statistique de la température moyenne mensuelle de 1960 à 2019 à Ziguinchor

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	juin
Tau de Kendall	0,267	0,289	0,412	0,437	0,455	0,621
P-value	0,016	0,011	0,012	< 0,024	0,070	0,017
Mois	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Tau de Kendall	0,610	0,587	0,634	0,575	0,440	0,435
P-value	< 0,021	0,013	0,015	0,016	< 0,033	< 0,012

Le degré de signification de la liaison entre les variables est évalué par le coefficient de corrélation de Pearson (r) dont la valeur absolue varie de 0 (absence totale de liaison) à 1 (une très forte liaison). Les données SPI corrélées aux températures moyennes mensuelles sur la même série temporelle indiquent une situation très dégradante des conditions thermiques en Basse-Casamance. Des corrélations élevées sont observées au mois de mars (0,77), avril (0,79), mai (0,81) et juin (0,89) comme l'indique le tableau 16. Pratiquement, les corrélations tendent vers une signification d'une liaison entre les SPI et les températures pour tous les mois. Une tendance qui explique une évolution liée aux modifications des paramètres climatiques. Globalement, la lecture des résultats donne une idée sur les

conditions d'humidité qui sont relativement faibles en Basse-Casamance, et celle-ci à toutes les échelles temporelles.

Tableau 16: Corrélation entre les données SPI mensuelles et températures moyennes mensuelles de 1960 à 2019

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr.	Ma	Ju	Jui	Ao	Sept	Oct	Nov	Déc
Coef	0,21	0,27	0,77	0,79	0,81	0,89	0,26	0,34	0,41	0,29	0,23	0,24

*Coef. =Coefficient

III.3.2. Évolution des températures annuelles de 1960 à 2019

A l'échelle annuelle, la même tendance à la hausse significative est observée (fig.16) sur les températures maximales (0,637°C par an), minimales (0,695°C par an) et moyennes (par 0,738°C an). Cette évolution des températures est notée à la station synoptique de Ziguinchor sur la période 1960-2019. L'augmentation de la température chaque année a accentué les conditions d'assèchement dans la zone d'étude.

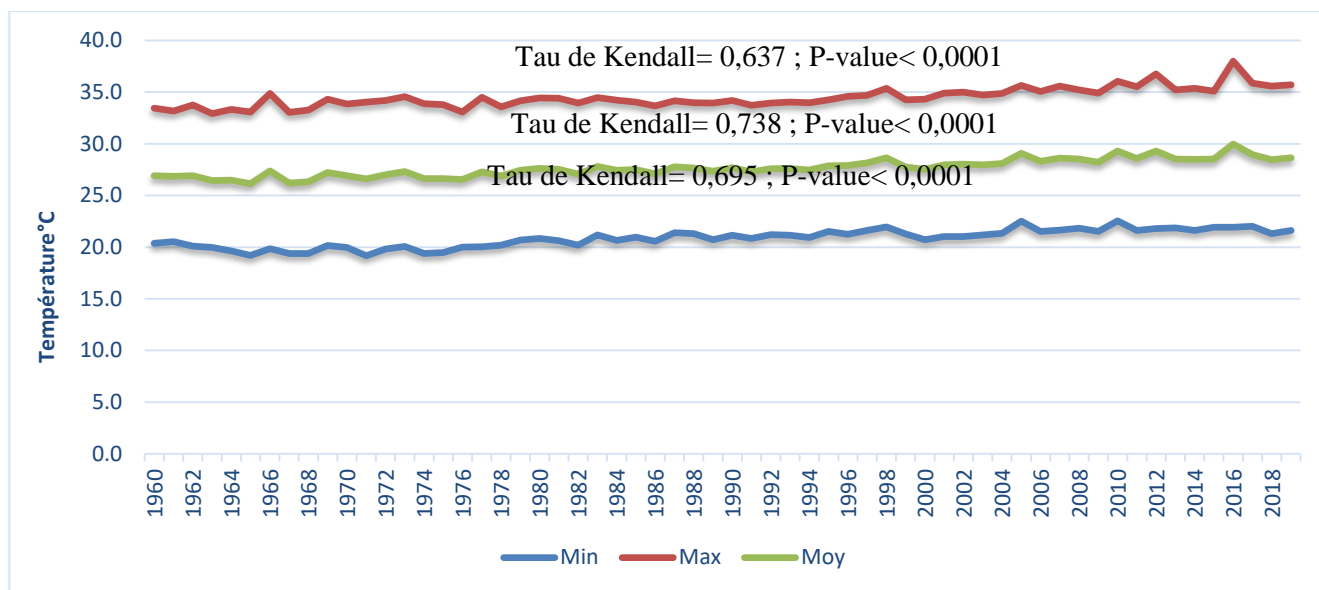


Figure 16 : Evolution des températures annuelles minimales, moyennes et maximales à la station de Ziguinchor de 1960 à 2019

III.4. Analyse des variables hydrologiques

Dans cette rubrique, nous avons utilisé la pluviométrie et la température pour estimer le potentiel d'eau évaporée, la pluie efficace, le potentiel de ruissellement et la lame d'eau

infiltrée. Ces éléments semblent être déterminants dans la connaissance de l'écoulement des eaux de surfaces d'un milieu. Selon Musy (1998), les précipitations sont évidemment le facteur essentiel des régimes hydrologiques puisqu'elles constituent la matière première des débits des cours d'eau. Pour une bonne connaissance du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, il s'avère important d'étudier les éléments qui contribuent à l'amélioration ou la diminution de l'apport d'eau, du stockage et des sorties. Toutefois, la complexité des bassins versants peut déterminer les résultats des composantes du bilan hydrique. Le concept de bilan d'un système hydrologique représente la balance comptable des entrées et des sorties des flux d'eau (Chennafi, 2016). Une compréhension du bilan hydrologique est extrêmement importante pour les études du cycle hydrologique et des projets de planification des ressources en eau (Love *et al.*, 2011 ; Karambiri, 2017).

III.4.1. Détermination de l'évapotranspiration

Elle permet de connaître la quantité ou le volume d'eau que les plantes dégagent pendant leur période de maturation. Elle commence par une approche plus participative dans la mesure où les actions des personnes influencent ce processus d'infiltration de l'eau. En fonction des données disponibles, nous avons appliqué les différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration réelle et potentielle sur la Base Casamance de 1960 à 2019.

III.4.1.1. Détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Le terme d'évaporation désigne les pertes en eau des nappes d'eau libres sous formes de vapeur d'eau (lacs, retenues d'eau, mares) alors que l'évapotranspiration regroupe les pertes en eau du sol : absorption de l'eau par le couvert végétal ou animal, restitution à l'atmosphère par transpiration (Morell, 1999). L'évapotranspiration réelle constitue la part de pluie retournant à l'atmosphère par évaporation directe ou par transpiration des végétaux (Thiery, 1977). La détermination de l'évapotranspiration réelle a été effectuée par la méthode de Coutagne (1935). Cette méthode donne de bons résultats dans l'étude du bilan hydrologique (N'guessan *et al.*, 2014). Elle permet de déterminer le déficit d'écoulement en fonction de la pluie et de la température.

L'estimation de l'évapotranspiration est motivée par le fait qu'il n'existe aucune donnée de référence de l'ETR dans nos bassins d'étude. La méthode Coutagne (1935) de l'estimation de l'évapotranspiration est décrite par l'équation suivante :

$$ETR = P - yP^2$$

Où $y = 1 / (0,8 + 0,145t)$

Avec t qui est la température moyenne annuelle en °C ;

P la précipitation moyenne annuelle.

L'évolution interannuelle des termes du bilan montre que les précipitations et l'ETR ont presque suivi la même dynamique évolutive. La quantité d'eau susceptible de contribuer au ruissellement est presque égale à 200 mm sur toute la série retenue (fig.17). La figure 17 montre qu'à chaque période où de fortes quantités de pluies sont enregistrées, la quantité d'eau évaporée augmente également. L'Évapotranspiration réelle représente plus de 80% du volume d'eau précipité sur toute la série retenue. La partie restante (20 %) constitue le faible volume qui contribue au ruissellement appelé la pluie efficace.

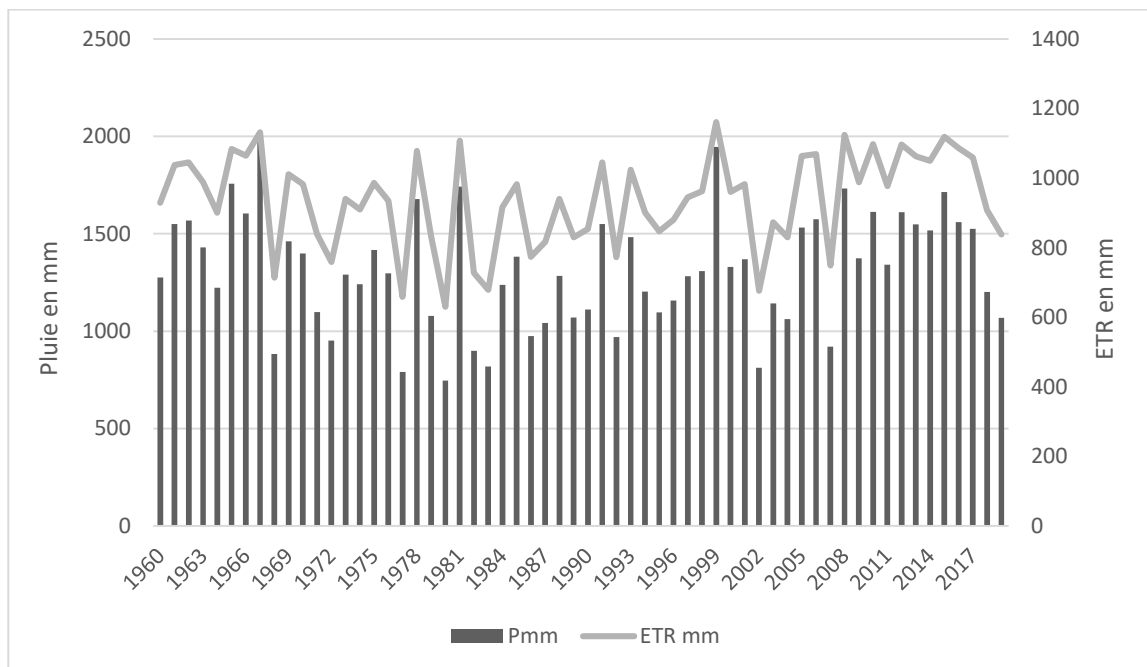


Figure 17 : Evolution interannuelle des précipitations et de l'ETR à la station de Ziguinchor

III.4.1.2. Détermination de l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Thornthwaite

Pour la détermination de l'évapotranspiration, Thornthwaite (1948) a développé une formule basée sur les températures moyennes :

$$ETP \text{ (mm en mois)} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a * F(y)$$

Où ETP= Evapotranspiration potentielle mensuelle en (mm) ;

T= La température moyenne mensuelle en degré (°C).

$$a = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3$$

I est l'indice thermique annuel (somme des 12 indices mensuels).

$$i(m) = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

Les données du facteur correctif varient en fonction de la position de la station (altitude, zone tempérée ; zone tropicale). Pour la station de Ziguinchor, les valeurs mensuelles du coefficient correctif F sont consignées dans le tableau 17 ci-dessous :

Tableau 17 : Les valeurs mensuelles du coefficient correctif la station de Ziguinchor

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
F	1	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	1,02	0,98

Les valeurs de l'ETP mensuelle sont en relation avec celles des températures à la station de Ziguinchor. A la période où on observe une hausse des températures, l'évapotranspiration potentielle augmente en même temps. Pratiquement, les mois d'avril, de mai et de juin enregistrent les températures élevées respectivement avec des valeurs d'ETP de 189,8 mm ; 208,1 mm et 206,1 mm (fig.18). Les valeurs deviennent faibles pendant les mois de décembre (103,9 mm) et janvier (104,2 mm) correspondant à la période de fraîcheur à Ziguinchor.

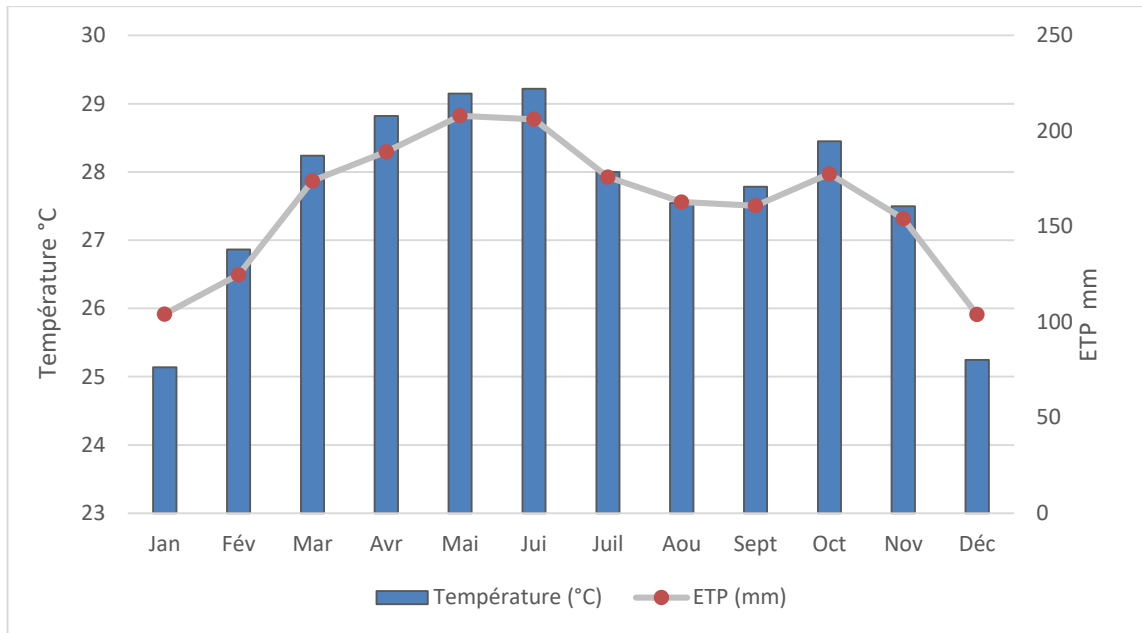


Figure 18 : Evolution mensuelle des températures et de l'évapotranspiration potentielle à la station de Ziguinchor

III.4.2. Détermination de la pluie efficace

Pour les hydrologues, la pluie efficace est la pluie qui contribue au ruissellement ou à l'écoulement de surface (Vittecoq *et al.*, 2010 ; Kouassi *et al.*, 2017). La pluie efficace (P_e) correspond à la pluie donnant lieu à un écoulement, superficiel ou souterrain immédiat ou différé. Ce terme du bilan hydrologique est de tout premier intérêt, car il conditionne au premier chef la disponibilité en eau, que ce soit vis-à-vis de son transfert rapide en surface (ruissellement) ou de son écoulement différé au travers des aquifères (Kouassi *et al.*, 2017). Elle est exprimée par la formule suivante :

$$P_e = P - ETR$$

Avec P_e : la pluie efficace (mm) ; P : la pluviométrie en mm ; ETR : évapotranspiration réelle (mm).

Sur la figure 19, nous avons mis en rapport la pluviométrie annuelle et la pluie efficace pour mieux estimer le potentiel en eau disponible ou susceptible de contribuer à l'écoulement et au ruissellement. Ainsi, on constate à travers les données de la figure 19 une évolution du volume d'eau précipité et du module d'eau écoulé de 1960 à 2019. Durant le quinquennat 1963-1967, de fortes pluies ont été enregistrées à la station de Ziguinchor associés à un volume d'eau écoulée fort. Les années où les quantités de pluies semblent diminuer, on

constate concomitamment une réduction du volume susceptible de contribuer à l'écoulement.

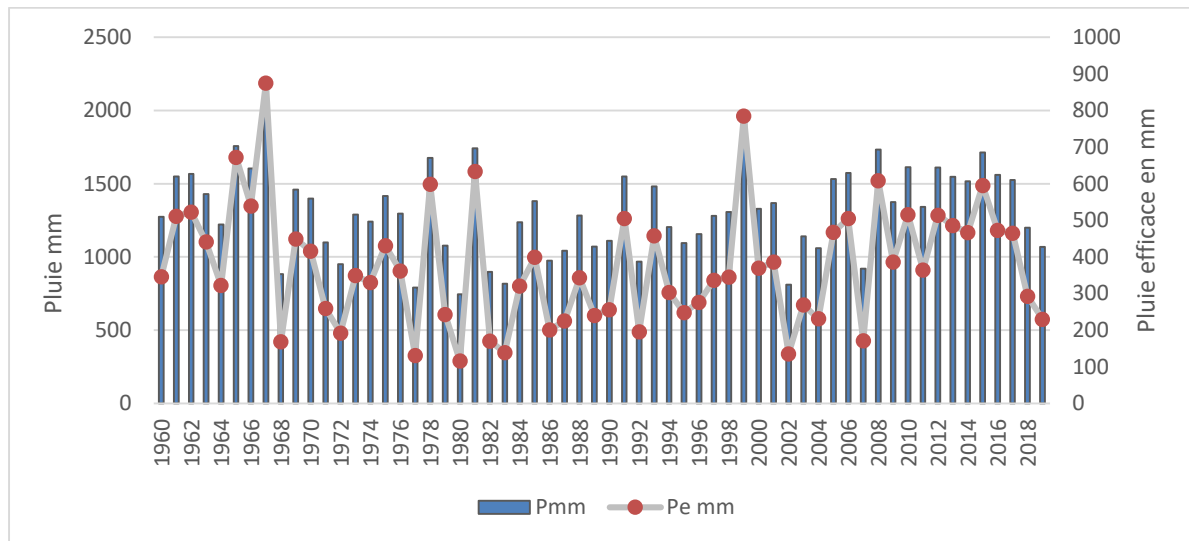


Figure 19 : Variations de la pluviométrie et de la pluie efficace de 1960 à 2019 à la station de Ziguinchor.

Conclusion du chapitre III

Cette étude a mis en évidence l'évolution climatique en Basse-Casamance qui se caractérise par une distribution spatio-temporelle irrégulière. Les tendances déterminées à l'échelle mensuelle indiquent des totaux pluviométriques importants pendant les mois de juillet, août et septembre dans les stations d'Oussouye, de Ziguinchor, de Bignona, de Nyassia et de Niaguis. On note, sur la période 1951-2019, une tendance à la hausse des précipitations entre 1951 et 1968, qui est la période considérablement humide, et une tendance à la baisse, marquée par des variabilités entre 1970 et 2019. Une reprise pluviométrique a été enregistrée à partir de la décennie 1991-2000, avec quelques variabilités au courant des décennies 2001-2010 et 2011-2020. Ces variabilités sont observées aussi, sur les normales pluviométriques 1971-2000 et 1981-2010, qui sont, moins humides que les normales 1951-1980 et 1961-1990 dans les stations d'Oussouye, Ziguinchor et Bignona. La situation thermique a connu également des variabilités temporelles de 1960 à 2019. Le test de Kendall indique des hausses de températures au courant des mois de mai ($0,455^{\circ}\text{C}$ par an), août ($0,587^{\circ}\text{C}$ par an) et octobre ($0,575^{\circ}\text{C}$ par an). Ces variations temporelles des précipitations et des températures impactent sur les paramètres hydrologiques en Basse-Casamance.

Les précipitations, qui constituent la principale source d'alimentation des hydrosystèmes, se dégradent et impactent le cours normal des sources d'eau existantes. En Basse-Casamance, cette variabilité n'est pas sans conséquence sur les ressources en eau de surface et sur les eaux souterraines.

Conclusion de la première partie

Dans la première partie, nous avons mis l'accent sur l'analyse des éléments physiques et socio-économiques des bassins versants d'étude. Les éléments physiques des bassins étudiés sont constitués, en général, de relief monotone, de variables orographiques quasi similaires dans les deux sites, d'une morpho-pédologie dominée par des vasières et des buttes résiduelles. L'hydrogéologie des deux bassins étudiés est constituée de dépôts originaires de la transgression marine du Nouakchottien et de dépôts gréseux-argileux. Le réseau hydrographique est constitué des marigots de Djibonker et d'Agnak et de chenaux secondaires qui alimentent les vallées et la nappe en saison des pluies.

Ces conditions biophysiques autorisent le développement des activités agricoles (91,6 %), de la pêche (2,8 %) et de l'élevage dans la zone, même, si par ailleurs, certaines activités sont au ralenti en raison des événements politico-militaires que connaissent certains terroirs villageois de la zone d'étude.

La situation climatique dans la zone est dominée par une variabilité pluviométrique à l'échelle mensuelle tout comme à celle interannuelle dans les stations de la Basse-Casamance. Elle a significativement altérée les conditions thermiques, avec des hausses de températures mensuelles au courant de la période 1960-2019. Ces événements climatiques ne sont pas sans affecter les eaux de surface et celles souterraine.

DEUXIÈME PARTIE

VULNÉRABILITE DES RESSOURCES EN EAU ET ÉVALUATION DES MATÉRIAUX SÉDIMENTAIRES DES MARIGOTS DE DJIBONKER ET D'AGNAK

Le bassin versant de la Casamance, entièrement situé dans le domaine climatique sud-soudanien, dispose d'importantes ressources en eau souterraine et de surface souvent exposées aux aléas naturels et aux fortes pressions liées aux activités humaines. Cette vulnérabilité des ressources en eau, en raison de leur dépendance vis-à-vis du climat et des problèmes relatifs à leur disponibilité et leur gestion, fait désormais partie des préoccupations majeures de la communauté scientifique (Alomosso, 2017). Ce phénomène rend vulnérable les communautés à forte dépendance de l'environnement biophysique, en particulier de l'eau. Aucun territoire n'échappe aujourd'hui, d'une façon ou d'une autre, aux problématiques liées à l'eau : disponibilité, qualité, conflits d'usage, risques et protection des milieux, entre autres (Ballouche et Taibi, 2014). L'eau est une ressource aux dimensions transversales et permet aux diverses personnes un usage complet et fort. Pour gérer l'eau, il faut une vision précise de la politique et aussi prévenir et préparer les communautés à faire face aux aléas environnementaux. L'évaluation rationnelle du potentiel en eau est dès lors d'une importance primordiale pour la planification, la protection et le contrôle de cette ressource pour laquelle l'analyse de la pluviométrie est le point de départ (Basistha *et al.*, 2009 ; Ghénim, *et al.* 2014). Pour une meilleure gestion des ressources en eau, le suivi de l'évolution des changements de stockage de l'eau terrestre (ATWS) dans l'espace et dans le temps reste une priorité, d'où l'importance d'utiliser l'outil Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), lancé en 2002 (Tapley *et al.*, 2004 ; Wahr *et al.*, 2004 ; Rodell *et al.*, 2004 ; Mohamed *et al.*, 2022). Les données GRACE se composent de l'humidité du sol de surface, de l'humidité du sol de la zone racinaire, des eaux souterraines, de l'eau stockée dans la végétation, ainsi que de l'eau des rivières et des lacs (Giorotto et Rodell, 2019 ; Mohamed *et al.*, 2022).

Dans cette partie, on aborde la vulnérabilité des eaux de surface et des eaux souterraines à partir des outils de la géomatique. Nous avons évalué d'abord le niveau de stockage d'eau à partir des données GRACE. Ensuite, le potentiel des eaux souterraines et la détermination

des sites inondables est déterminé à partir de la modélisation hydrogéologique. Enfin, une évaluation *in situ* des flux sédimentaires et par télédétection est réalisée.

CHAPITRE IV : RESSOURCES EN EAU ET ÉVALUATION DU POTENTIEL D'EAU DE SURFACE ET SOUTERRAINE

Cette sous-section fait état des ressources en eau disponibles en Basse-Casamance et de manière spécifique dans les bassins d'étude. Les données de plusieurs stations ont été utilisées pour mieux apprécier la distribution et la variabilité spatio-temporelle des stockages d'eau en Basse et Moyenne-Casamance. D'abord, nous avons fait un diagnostic global des différents types de ressources en eau et, ensuite une évaluation à partir des outils d'analyse spatiale et des données mondiales sur les eaux de surfaces (GRACE). La méthode FIGUSED-S a été mise à contribution pour déterminer le risque d'inondation et cartographier les sites susceptibles d'être inondés. Ensuite, le potentiel en eau souterraine des bassins étudiés est déterminé par la méthode AHP-Analyse à multicritères. Les paramètres susceptibles de contribuer à l'alimentation des ressources souterraines sont mobilisés dans cette section pour faire ressortir les valeurs de chaque indice. Enfin, à partir des données piézométriques et des indices déterminés, le risque de vulnérabilité des ressources en eau est caractérisé.

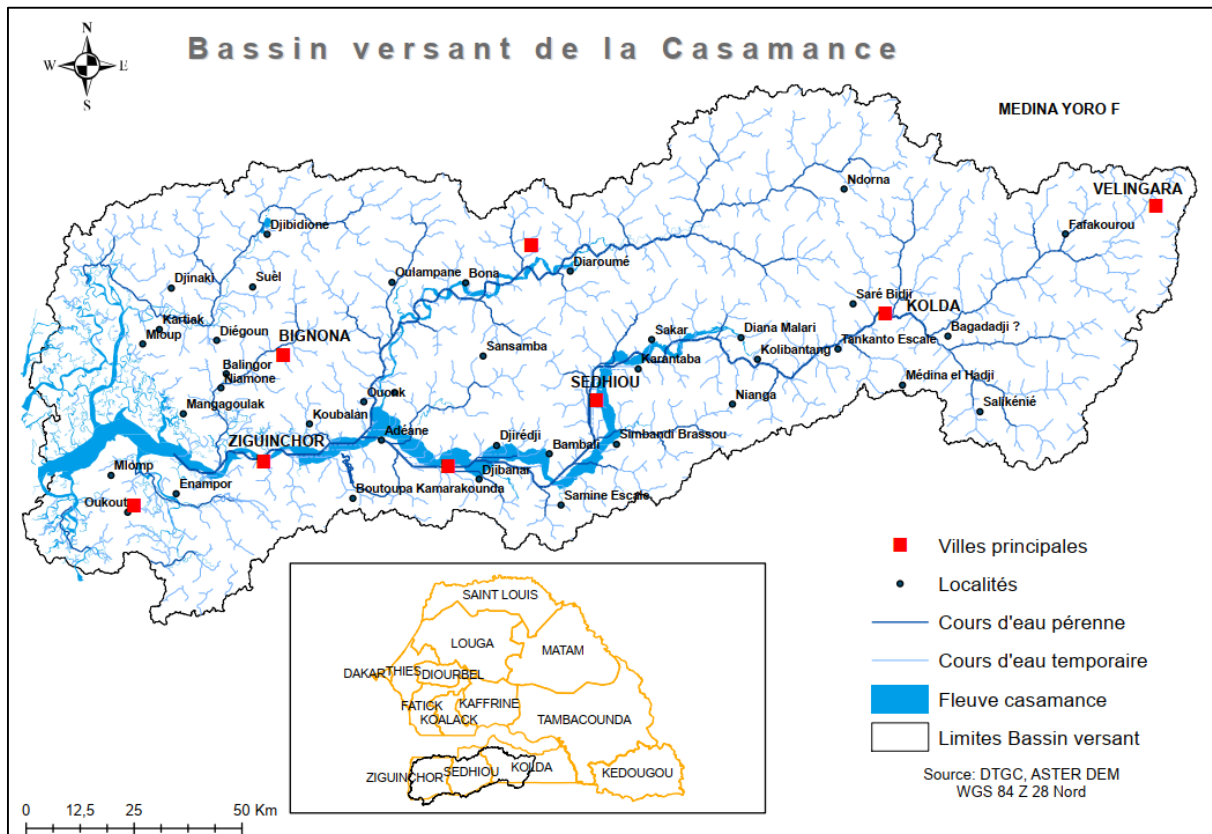
IV.1. Ressources en eau de surface

La Casamance dispose d'importantes ressources en eau qui dépendent essentiellement de la pluviométrie. Il s'agit des marigots, des rivières et des mares reliés au fleuve Casamance, à la Gambie et à l'Océan Atlantique (carte 18).

Les marigots sont identifiés le plus en milieu continental, avec un fonctionnement hydrologique tributaire du réseau principal. Ils sont bordés par des ensembles de relief dépressionnaires dont les points les plus importants se forment comme une cuvette de décantation. Souvent alimentés par le fleuve ou le cours d'eau principal, les marigots du bassin de la Casamance, en l'occurrence celui de Diouloulou et Baïla inondent des terres de cultures. Compte tenu de leur fonction de drainage, les marigots de Baïla et de Diouloulou contribuent à l'alimentation des vallées. Ils sont classés dans la catégorie des cours d'eau pérennes. Dans la zone de Ziguinchor, on a le Kamobeul *bolong*, l'un des plus grands affluents de la Casamance. Au niveau de la partie de Sédhiou, le Soungrougrou (affluent de la Casamance) dispose des chenaux sinueux raccordés aux petites vallées du Diassing, du Kabada et du Pakao.

Les cours d'eau temporaires, ou petits marigots terrestres sont identifiés en terre de cuvettes approvisionnant les petites vallées. Du point de vue de la distribution hydrologique,

ils sont classés comme des cours d'eau d'ordre 3. Les mutations observées (salinité élevée, sédimentation, etc.) autour de ces petits cours d'eau sont dues à la variabilité hydroclimatique. Fortement tributaires de la pluviométrie, leurs débits augmentent au courant des mois de juillet, août, septembre et octobre. Toutefois, de légères variations hydrologiques sont observées de part et d'autre du bassin de la Casamance, surtout dans les zones où l'usage de l'eau semble atteindre une croissance considérable.

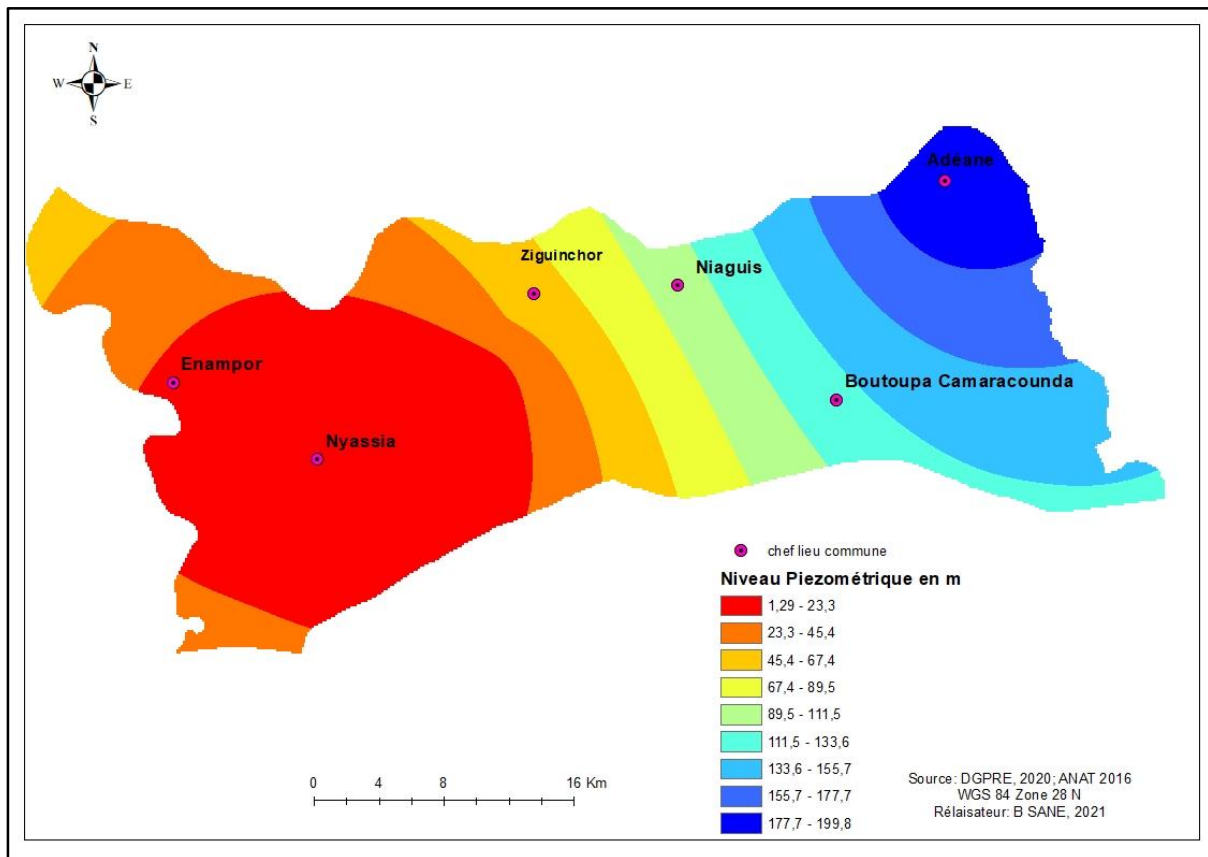


Carte 18 : Ressources en eau de surface de la Casamance.

IV.2. État des ressources piézométriques (forages)

Les réserves en eau souterraine emmagasinée dans le sous-sol du département de Ziguinchor sont très importantes. Toutefois, on constate une hétérogénéité spatiale de leur distribution. Les données tirées de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau (DGPRES) indiquent plusieurs niveaux piézométriques de l'eau dans la zone. Les niveaux piézométriques les plus profonds sont observés dans la partie orientale du département à hauteur des localités de Boutoupa-Camaracounda et d'Adéane. Cette variation s'explique par la position de ces localités qui se trouvent à hautes altitudes. La ressource eau peut être trouvée à une profondeur de plus de 100 m. Dans la partie centre, à proximité de la commune de Ziguinchor et de Niaguis, la profondeur des eaux de forage est

comprise entre 45-110 m (carte 19). Le niveau piézométrique décroît à hauteur d'Enampore et de Nyassia, plus proche de l'exutoire du bassin de la Casamance. Le niveau piézométrique des forages varie de 1,5 à 25 m. Ces niveaux dépendent de la source de collecte de l'eau. Pour les puits et mini-forages privés, on peut trouver de l'eau à des profondeurs plus faibles (2 à 15 m).



Carte 19 : Distribution spatiale des niveaux piézométriques des eaux dans le département de Ziguinchor

IV.3. Évaluation et représentation des eaux de surface et eaux souterraines par l'approche gravimétrique

La variation de la disponibilité de l'eau dans un bassin versant exige l'application de données géospatiales pour suivre leur évaluation en un temps record. Ainsi, pour analyser la variation interannuelle du stockage d'eau terrestre en Basse-Casamance, les données de GRACE ont été utilisées. Elles sont obtenues à partir d'un ensemble de données de hauteur d'eau équivalentes du Centre spatial français/Groupe de recherche en géodésie spatiale basé à Toulouse (CNES/GRGS, version actuelle : RL02-v3. Monthly) disponible sur : <http://www.thegraceplotter.com>. Les données ont été sélectionnées au niveau des trois

stations (Oussouye, Ziguinchor et Bignona) en Basse-Casamance, mais aussi sur deux stations de la Moyenne Casamance (Boukiling et Sédhiou).

Des calculs ont été effectués pour ressortir les déficits de stockage d'eau, les anomalies et le test de corrélations entre SPI et ISET afin d'évaluer les incidences de la pluviométrie sur les eaux de surface.

Le déficit de stockage basé sur les données de GRACE (SET) est défini comme la différence entre les valeurs de la série chronologique du stockage d'eau terrestre avec GRACE (ASET) et la moyenne de SET (Thomas *et al.*, 2014), est donnée comme suit :

$$SET_{i,j} = ASET_{i,j} - ASET$$

Où $SET_{i,j}$ est la série chronologique inférée de GRACE ($ASET_j$) pour le mois de j de l'année i , et $ASET_j$ est la moyenne à long terme (de janvier 2003 à décembre 2015) du SET pour le même mois dans une année. Une valeur de stockage négative représente un déficit de stockage des eaux de surface par rapport à ses valeurs mensuelles moyennes, tandis qu'une valeur positive indique un stockage élevé.

Pour mieux caractériser les variations mensuelles des niveaux de stockage d'eau basées sur le SET et pour comparer le SET avec d'autres indices de sécheresse, nous avons normalisé ce paramètre pour obtenir un indice du stockage d'eau terrestre (ISET) défini comme suit :

$$ISET = \frac{SET - \mu}{\sigma}$$

Où μ et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type des séries temporelles de SET. La série chronologique des ISET représente l'écart saisonnier moyen par rapport aux conditions moyennes et son ampleur indique l'intensité de la sécheresse.

Dans les conditions d'humidité relative, les températures représentent les unités de référence qui facilitent l'analyse de la situation thermique mondiale. Nous les avons associées aux données ISET pour mieux ressortir la tendance temporelle des stockages d'eau en Basse-Casamance.

IV.3.1. La mission GRACE

Depuis son lancement en 2002, GRACE s'est avéré être un outil précieux pour la surveillance, à la fréquence mensuelle voire décadaire, des transferts de masse au sein du

système terre et de leur redistribution dans ses enveloppes fluides (Feng, 2014). Nous avons utilisé cinq (5) stations réparties géographiquement en Moyenne et Basse-Casamance pour caractériser la situation des eaux de surface. Les données brutes téléchargées de la plateforme GRACE avec les coordonnées des stations sont consignées dans le tableau 18 ci-dessous.

Tableau 18 : Caractéristiques des stations retenues pour les données de GRACE

Sites	Latitude	Longitude	Hauteur d'eau maximale (cm)	Hauteur d'eau minimale (cm)	Amplitude annuelle (cm)	Tendance (cm/an)
Bignona	12,8	16,23	25,858	-21,198	14,217	1,032
Sédhiou	12,7	15,55	27,574	-22,593	14,281	1,217
Ziguinchor	12,44	16,27	24,171	-19,617	12,994	1,005
Oussouye	12,49	16,54	32,473	-27,646	17,6	1,363
Boukiling	12,87	15,86	30,141	-25,531	15,9	1,364
Moyenne Zone	-	-	25,858	-21,198	14,217	1,03

Bien vrai qu'elle semble courte la série de données GRACE, les hauteurs d'eau enregistrées sur 13 années donnent une idée sur la tendance des hauteurs d'eau terrestre. Compte tenu de la fluctuation temporelle des précipitations dans les stations étudiées, les indices obtenus ont permis d'identifier deux périodes de hauteurs d'eau. La première phase va de février 2003 à juillet 2009 avec généralement des niveaux de stockage relativement bas indiquant de fait des valeurs négatives (fig.20). La baisse des hauteurs d'eau la plus importante a été enregistrée en 2003 (-4,7 cm). La deuxième phase se distingue par des hauteurs d'eau élevées. De 2010 à 2015, les niveaux de stockage d'eau terrestre sont relativement importants ; ce qui signifie une forte alimentation des aquifères souterraines. Le niveau d'alimentation le plus élevé qui correspond à la hauteur d'eau équivalente la plus élevée a été observé au mois d'octobre 2013 avec une valeur de 8,6 cm (fig.20).

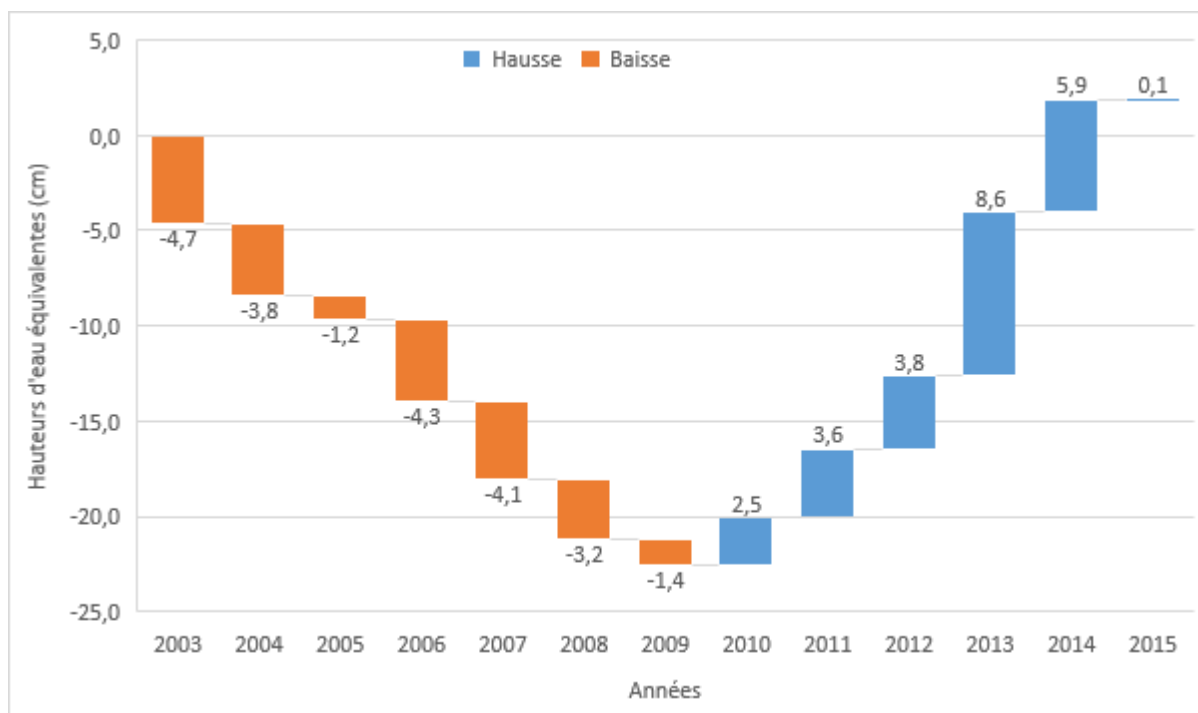


Figure 20 : Evolution des moyennes annuelles des hauteurs d'eau terrestre aux stations de Ziguinchor, Sédhiou, Bignona, Oussouye et Bounkiling

A l'échelle mensuelle, on observe une évolution des valeurs des indices de stockage d'eau terrestre (ISET) au niveau des stations étudiées. Le niveau de stockage d'eau le plus élevé est observé au courant des mois d'août, de septembre et d'octobre. Les indices moyens de stockage d'eau enregistrés sont respectivement de 1,36 ; 1,32 et 0,67 (fig.21). Le mois d'octobre de l'année 2010, a enregistré le niveau d'eau le plus élevé avec une moyenne de 2,12 (fig.21). Ces excédents de hauteurs sont notés sur l'ensemble des cinq (5) sites étudiés. En revanche, les hauteurs de stockage d'eau les plus basses sont enregistrées aux mois de février, de mars et d'avril sur l'ensemble des sites. Les valeurs de stockage de ses périodes sont relativement faibles et l'approvisionnement de la nappe relativement faible à cette période. Ces mois se distinguent par l'épuisement relativement rapide du volume de stockage d'eau.

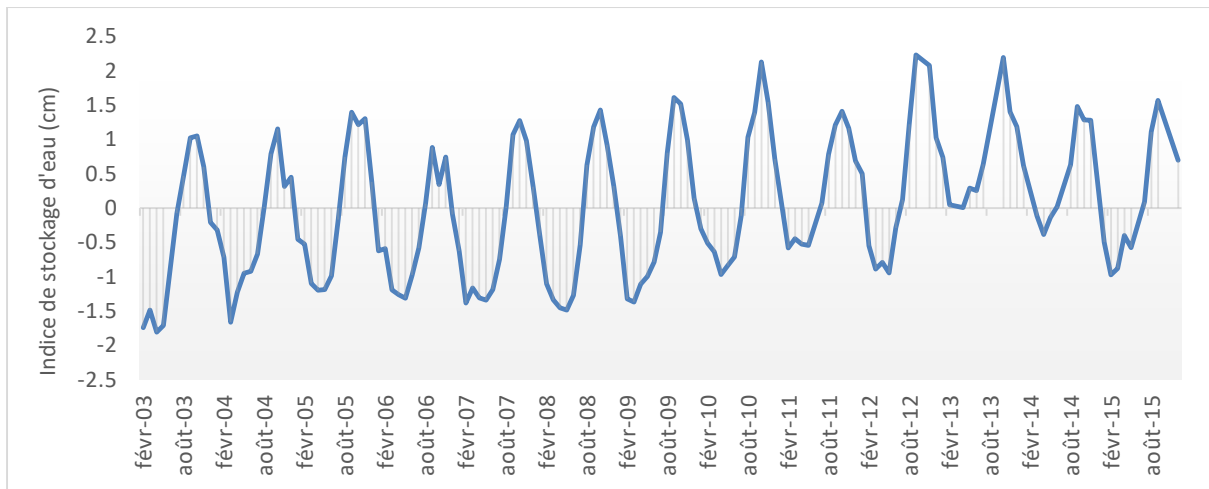


Figure 21 : Evolution moyenne mensuelle des indices de stockage d'eau (ISET) de 2003 à 2015 dans les stations étudiées

IV.3.2. Mise en relation des hauteurs d'eau équivalentes et des pluies moyennes mensuelles dans les sites étudiés

Il est évident qu'une relation existe entre les hauteurs de stockage d'eau et les précipitations dans les stations étudiées. Les périodes à indices élevés correspondent au temps de pluies dans les sites d'étude. Les mois d'août, de septembre et d'octobre se distinguent avec des quantités de pluies mensuelles moyennes importantes et des volumes d'eau ruisselée et infiltrée conséquentes ; enregistrent en même temps des hauteurs d'eau équivalentes comprises entre 15 et 25 cm (fig.22). Les précipitations les plus importantes ont eu lieu au cours des saisons de pluies de la période 2010-2015, et que ces périodes correspondent aux pics de la série chronologique des SET. De l'hivernage 2008 à 2015, de fortes quantités de pluies ont été enregistrées, d'où les valeurs importantes des indices de stockage d'eau (fig.22). Les périodes à épuisement de stockage d'eau relativement importantes d'eau correspondent au mois hors saisons de pluies (mars, avril et mai) dans tous les sites étudiés. Les hauteurs d'eau équivalentes les plus faibles dans la zone sont notées durant le quinquennat 2004-2008.

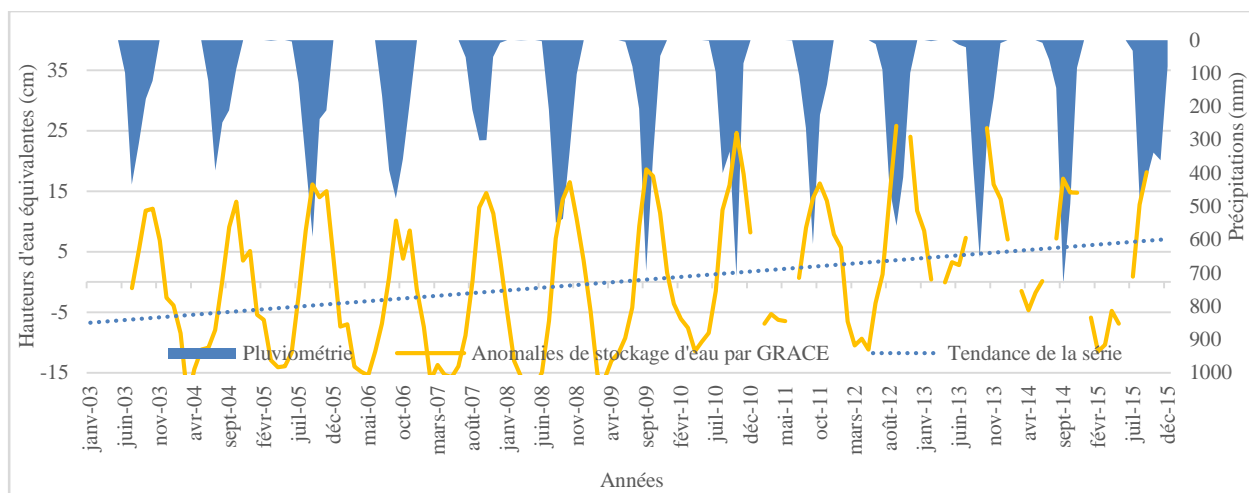


Figure 22 : Relations entre indices de stockage d'eau terrestre (ISET) et précipitations (mm) dans la zone d'étude

A l'échelle annuelle, le stockage d'eau a augmenté à un taux de 4,1 cm / an entre 2003 et 2015, tandis que les précipitations ont augmenté un peu moins fortement, à un rythme de 0,25 mm / an.

Des déficits importants en stockage d'eau ont été enregistrés entre 2003 et 2009 (fig. 23). Plus spécifiquement, des déficits de -21,02 cm et de -19,98 cm ont été détectés en avril 2003 et en mai 2004, respectivement.

A partir de l'année 2010, on constate une tendance ascendante des stockages avec notamment de légères variations. Les périodes à épuisement rapides de stockage d'eau deviennent inférieures à celles aux stockages positifs.

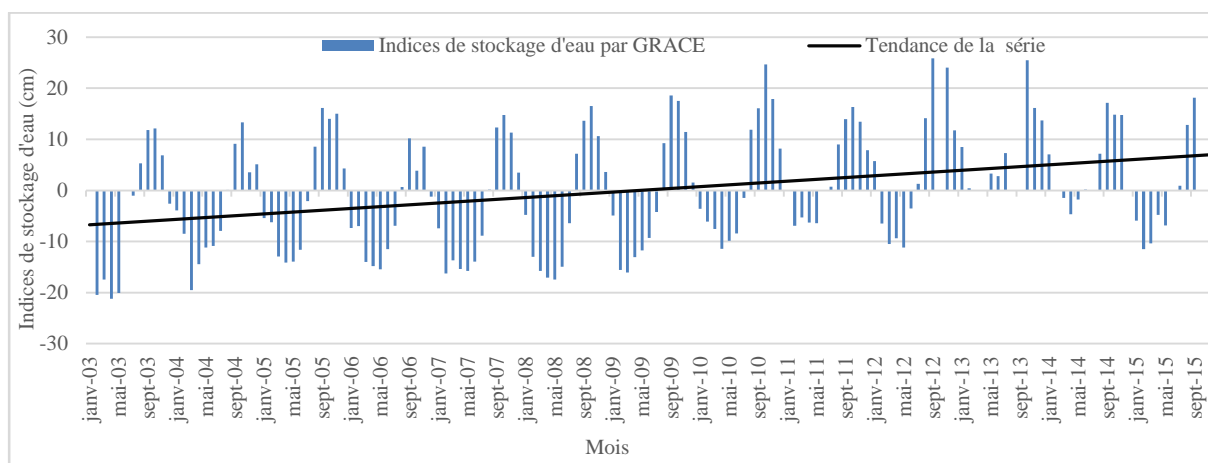


Figure 23 : Anomalies de stockage d'eau de 2003 à 2015

IV.3.3. Corrélation Indices de GRACE et Indices de sécheresse (SPEI)

Pour mieux caractériser cette variation de stockage d'eau à partir des données GRACE, il est nécessaire de les associer avec les indices de sécheresse les plus utilisés en analyse

hydrologique. Il s'agit de l'indice standardisé de précipitations (SPI) et de l'indice standardisé de précipitations et d'évapotranspiration (SPEI). Les indices de sécheresse sont associés aux données de température et de précipitations (SPEI). Le SPEI amélioré par Serrano *et al.* (2010) est appliqué à partir du calcul de l'ETP et de l'ETR (méthode de Coutagne, 1935).

Une forte corrélation est observée sur la figure 24 en août et en septembre entre l'ISET et le SPI (2009). Les excédents des ISET correspondent aux années dont les SPI sont positifs.

Également, en octobre 2013, période pendant laquelle les ISET et SPI positifs atteignent leurs pics. Le SPEI, au contraire, atteint sa séquence négative la plus importante de -2,97 (fig.24).

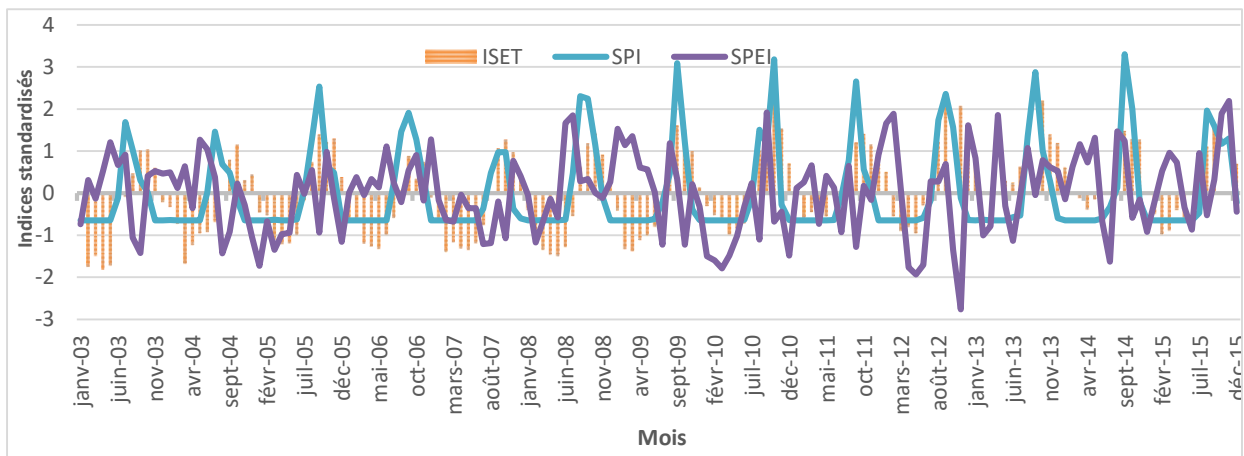


Figure 24 : Relations des indices normalisés (ISET, SPI et SPEI) de 2003 à 2015

IV.3.4. Évolution spatio-temporelle des ISET dans les sites retenus

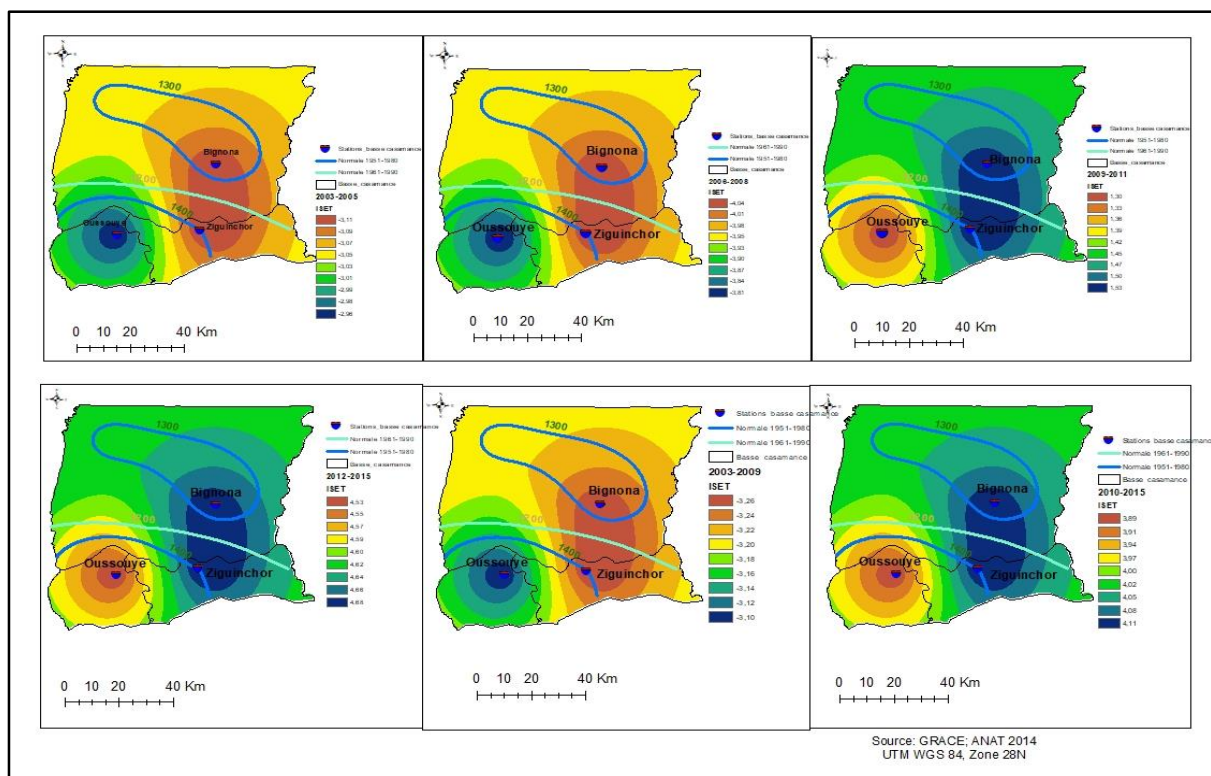
Pour mieux comprendre et visualiser les variations interannuelles de stockage d'eau terrestre obtenues à partir de GRACE, nous avons procédé à une spatialisation des valeurs moyennes de stockage d'eau sur six sous-périodes. Il s'agit de la période 2003-2005 ; 2006-2008 ; 2009-2011 ; 2012-2015 ; 2003-2009 et 2010-2015. L'idée est d'avoir une perception de l'étendue des déficits de stockage sur les autres localités de la Basse-Casamance.

Comme indiqué sur la carte (carte 20), les variations des niveaux d'eau indiquent un épuisement rapide du stockage sur les trois périodes 2003-2005 ; 2006-2008 sur l'ensemble des sites. Les ISET les plus faibles sont observés plus au nord entre Ziguinchor et Bignona. La tendance des ISET est égale -3 (2003-2005) ; -4 (2006-2008) respectivement à Bignona et Ziguinchor.

C'est à partir de 2009-2011 et 2012-2015, qu'on commence à observer des indices positifs indiquant un stockage d'eau relativement important. L'observation semble être la même, avec une variation spatiale à l'échelle mensuelle des stockages d'eau dans la zone pour l'ensemble des périodes.

Les déficits de stockage les plus importants sont observés aux mois de mars, avril et mai sur toute la série temporelle des ISET. A cette période, les indices d'ISET sont majoritairement compris entre -9 et -11 (carte 20). La reprise de stockage normal est notée au mois d'août, où l'humidité semble être renforcée par un apport pluviométrique conséquent.

Ces valeurs indiquent un important déficit de stockage d'eau au courant de ces mois, et pratiquement une faible alimentation des nappes souterraines conjuguée aux pressions humaines sur la ressource en eau. Cette répartition spatiale des indices de stockage d'eau corrobore également la migration des isohyètes au niveau des stations étudiées.



Carte 20 : Distribution mensuelle des ISET en Basse-Casamance de 2003 à 2015

IV.4. Variabilité saisonnière des hauteurs d'eau limnimétrique à Djibonker

Au Sénégal, le suivi de la dynamique des ressources en eau est assuré par la DGPRE qui, depuis plus de trente ans, gère cette mission. Des appareils ont été installés sur l'étendue du

territoire national pour une bonne quantification, une évaluation et une mise en œuvre des politiques de gestion de l'eau. Par ailleurs, beaucoup d'outils ont été affectés par les travaux de réhabilitation de routes et/ou de pistes de production, une absence de suivi et une faible appropriation des outils par les communautés.

Aujourd'hui, la structure est en train de réhabiliter les anciennes stations de mesure et d'installer de nouvelles pour une mise à jour de la base de données nationale. Les données hydrologiques sont pratiquement lacunaires et les campagnes de suivi sont rarement exhaustives.

En 2017, à proximité de l'exutoire du bassin de Djibonker, a été installée une échelle limnimétrique (photo 5). L'observation des hauteurs d'eau a débuté tardivement (2017). L'enregistrement se fait à l'échelle journalière par un lecteur qui s'assure de relever les hauteurs d'eau deux fois par jour, à 08h et à 18h. Dans le souci de trouver des données disponibles dans la zone, nous avons préféré travailler uniquement avec les données de 2018 à 2020, soit trois années de suivi.



Photo 6 : Image d'un relevé de hauteur d'eau de la station limnimétrique de Djibonker (octobre, 2021)

Les hauteurs journalières sont issues des moyennes établies à partir des relevés biquotidiens effectués. Sur la figure 25 des données relevées à Djibonker, on observe une variation temporelle du niveau d'eau. Pratiquement, les volumes d'eau les plus élevés sont enregistrés durant les mois de juillet, août, septembre et octobre. Les maxima sont enregistrés pendant les mois de septembre et octobre coïncidant à la période des hautes eaux en Basse-Casamance. A cette période, les hauteurs augmentent approximativement entre

120 cm et 135 cm, au mois de septembre, période de pic des hauteurs d'eau (fig. 25). Au début du mois de novembre, on note une légère baisse qui va se poursuivre jusqu'en juillet.

En analysant la courbe pour chaque année, on constate également une régression des hauteurs d'eau entre 2018 et 2020. On observe une importante diminution en 2018, entre les mois de mars, avril, mai et juin. En 2019, cette même variation est observée, sur pratiquement tous les mois. On observe la même tendance en 2020, une légère augmentation des volumes d'eau au courant des mois de juillet, août et septembre, période correspondant à la saison des pluies.

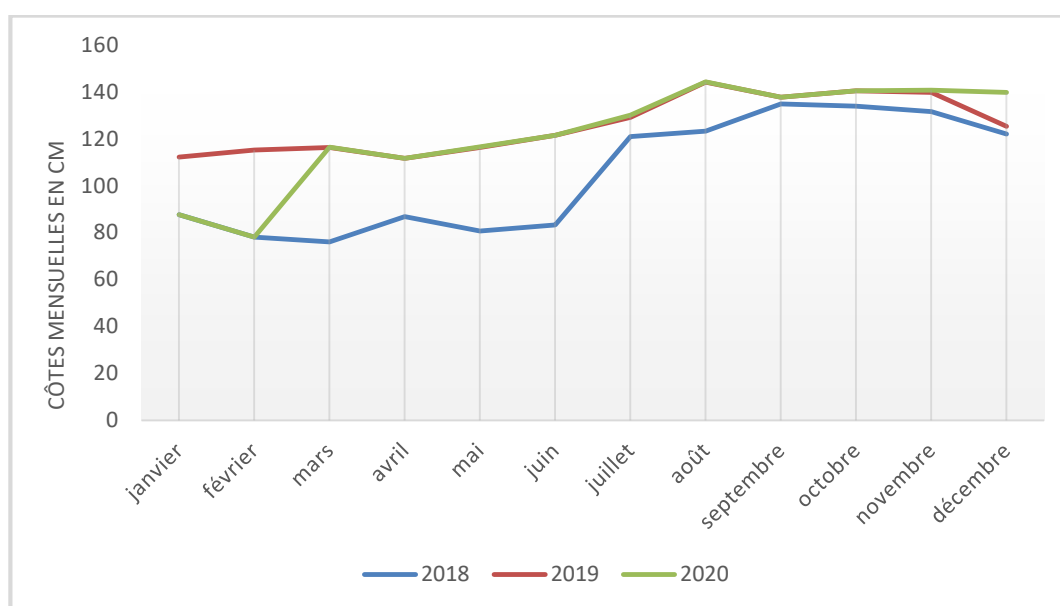


Figure 25 : Côtes annuelles des hauteurs d'eau à Djibonker de 2018 à 2020

(Source : Brigade hydrologique de Ziguinchor, 2020)

IV.5. Évaluation du risque d'inondation à travers la méthode FIGUSED-S

De par les méthodes d'analyse existantes, nous avons procédé à la superposition des variables retenues pour déterminer le risque d'inondation dans un bassin versant. Les données géologiques, hydrogéologiques, morphométriques, de pluviométrie, d'occupation des sols, de topographie (pente et élévation) ont été mobilisées pour évaluer les zones inondables. Ainsi, les sites inondables ont été déterminés dans ce travail via les outils d'analyse spatiale et de télédétection. L'objectif est de comprendre et d'analyser la réaction hydrologique de chaque bassin versant. Il s'agit également, de faire une comparaison des risques d'inondation entre les deux bassins versants.

IV.5.1. Données et méthodes de représentation cartographique de l'indice

La méthode FIGUSED regroupe sept (7) paramètres qui permettent d'établir une carte du risque d'inondation. Chacune des cartes thématiques utilisées a un pourcentage spécifique qui contribue à favoriser ou contribuer au risque d'inondation. Ces informations sont traitées dans une deuxième phase et, avec la définition des poids des paramètres, elles aboutissent à l'indice FHI (fig.26). L'indice d'inondation déterminé est le résultat des sept (7) variables qui caractérisent la méthode FIGUSED. Comme indiqué sur la figure 26 ci-dessous, nous avons les paramètres et le processus de détermination du risque d'inondation par la méthode FIGUSED.

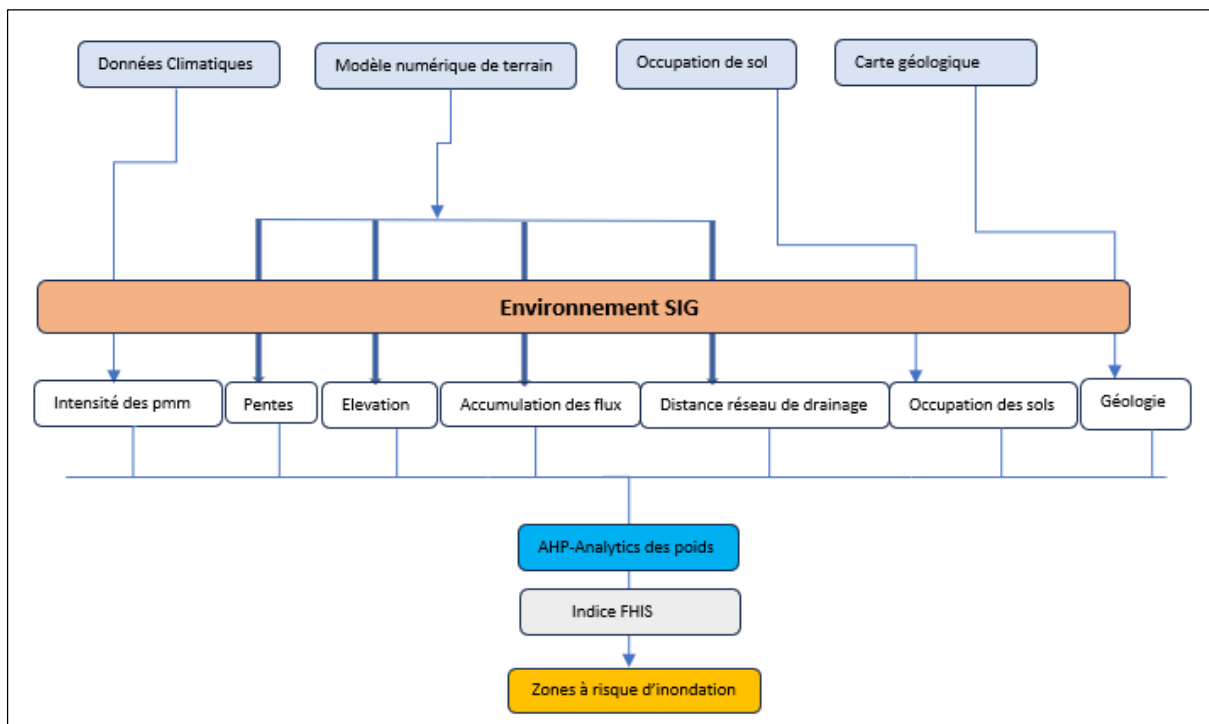


Figure 26 : Composantes et différents paramètres de la méthode FIGUSED

IV.5.1.1. Poids relatifs des critères

La méthode FIGUSED prend en compte les paramètres hydrogéologiques et morphologiques ci-dessus et le poids de chaque facteur détermine son rôle dans le résultat final (Kazakis *et al.*, 2015). L'analyse spatiale des zones étudiées permet d'évaluer chaque point de grille pour chaque paramètre. Ensuite, en fonction des conditions locales (conditions physiques), chaque point de grille ou valeurs intermédiaires des paramètres se voit attribuer des valeurs sur une échelle de 2 à 10 (score d'évaluation). Les classes d'accumulation de flux, d'élévation et d'intensité des précipitations ont été définies à l'aide

de la méthode de classement des ruptures naturelles utilisées dans des études similaires (Huan *et al.*, 2012 ; Kazakis et Voudouris, 2015 ; Bennani, 2020).

Les valeurs acquises sont traitées afin de calculer l'importance relative de chaque critère et le facteur de pondération correspondant (w). Après le calcul des pondérations, le FHIS est obtenu à l'aide de l'équation ci-dessous (Kazakis *et al.*, 2015) :

$$FHI = \sum_{i=1}^n r_i * w_i = F * w_f + I * w_i + G * w_g + U * w_u + S * w_s + E * w_e + D * w_d$$

Avec :

r_i : le classement du paramètre en chaque point ;

w_i : le poids de chaque paramètre ;

n : le nombre de critères.

IV.5.1.2. Hiérarchisation Analytique

L'Analytic Hierarchy Process (AHP) est une technique structurée utilisée pour analyser des problèmes complexes, où un grand nombre d'objectifs ou de critères interdépendants sont impliqués (Kazakis *et al.*, 2015). Les poids de ces critères sont définis après qu'ils aient été classés en fonction de leur importance relative. Ainsi, une fois que tous les critères sont triés de manière hiérarchique, une matrice de comparaison par paire est créée pour chaque critère afin de permettre une comparaison de l'importance (Kazakis *et al.*, 2015 ; Bennani, 2020).

L'accumulation du débit a été considérée comme le paramètre le plus important dans diverses études (Kazakis *et al.*, 2015 ; Adlyansah *et al.*, 2019 ; Bennani, 2020). Le tableau 19 illustre l'importance de la distance par rapport au réseau de drainage et de l'élévation sur la définition au risque d'inondation. Le facteur de distance par rapport à la rivière et l'altitude de la zone sont considérés comme des niveaux parallèles en tant que deuxième paramètre, car les zones d'inondations sont souvent situées à de faibles altitudes et à proximité d'un cours d'eau (marigot, rivière, mer, fleuve). L'utilisation des terres et l'intensité des précipitations sont considérées comme le troisième paramètre, bien que selon Liu *et al.* (2003) ; Kourgialias *et al.* (2011) et Wibowo *et al.* (2020) ce paramètre est prioritaire. Les valeurs sont affectées par ordre d'importance des sept (7) paramètres déterminant dans la définition du risque d'inondation.

Tableau 19 : Principes de hiérarchisation Analytique des paramètres des bassins d'étude

Paramètres	Accumulation de débit	Distance réseau de drainage	Élévation	Occupation du sol	Intensité des pmm	Pentes	Géologie
Accumulation de flux	1	2	2	3	3	5	7
Distance réseau de drainage	1/2	1	1	3	3	4	6
Élévation	1/2	1	1	3	3	4	6
Occupation du sol	1/3	1/3	1/3	1	2	4	5
Intensité des pmm	1/3	1/3	1/3	1/2	1	4	5
Pentes	1/5	1/4	1/4	1/4	1/4	1	3
Géologie	1/7	1/6	1/6	1/5	1/5	1/3	1

IV.5.1.3. Contrôle de cohérence

Une fois la matrice des vecteurs propres du AHP est créée, une évaluation de sa cohérence est nécessaire. Le niveau de cohérence est évalué à l'aide de l'indice suivant :

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

CR : représente le rapport de consistance, CI : l'indice de cohérence, RI : l'indice aléatoire

Tableau 20 : Indice aléatoire (Ri)

Nombre de paramètres	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Indice aléatoire (RI)	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Source : Kazakis *et al.*, 2015

L'indice est égal à 1,32 étant donné que nous travaillons avec sept (7) paramètres.

La théorie du processus hiérarchique analytique (AHP) suggère que le rapport de consistance (CR) doit être inférieur à 0,1.

L'indice de cohérence (CI) se calcule à partir de l'équation suivante :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

λ_{max} : valeur max de la matrice de comparaison et n : le nombre de critère

Après calcul on obtient pour : $\lambda_{\max}=7,6$; $n=7$ et $RI=1,32$ et un rapport de consistance CR de l'ordre de 0,08. Puisque la valeur CR est inférieure au seuil (0,1), la cohérence des pondérations est confirmée.

IV.5.1.4. Méthodes de représentation cartographiques des paramètres du modèle FIGUSED

Les données utilisées dans la cartographie du risque d'inondation ont été intégrées dans l'environnement SIG et représentées par ordre d'importance. Elles sont indiquées comme suit :

-Accumulation de flux dans les deux bassins

A partir du modèle numérique de terrain (MNT), nous avons déterminé les points d'accumulation de flux des bassins. Il s'agit de ressortir à partir de la distribution des cours d'eau de chaque bassin, les points de concentration des eaux, dénommés « flux accumulation ou accumulation des débits ». Les points d'accumulation des flux sont déterminés par l'extension « Arc hydrology ». La classification des zones pour chaque paramètre en 5 classes est due au fait que la division en cinq classes est une chose courante dans les recherches de ce type (Kazakis, et al., 2015 ; Hamdani et al., 2014 ; Lestari, 2008 ; Pratomo, 2008). Cette division est également considérée par l'auteur comme la division idéale, car si elle est divisée en trois classes, elle est trop rigide et si la distribution est supérieure à cinq classes, la division des classes est trop importante. Les paramètres d'accumulation du débit ont une plage de valeurs allant de 0 à 16 054. Plus la valeur du débit cumulé est élevée, plus l'eau accumulée dans la zone est importante (Adlyansah, 2019).

Au niveau des bassins, les indices d'accumulation élevés sont localisés au niveau du lit du cours d'eau principal. Les valeurs d'indices moyennes sont identifiées dans les vallées ou zones de convergence des eaux de ruissellement en période de pluie. Les indices obtenus sont compris entre 2 et 10 (carte 21).

-Distance par rapport au réseau de drainage

Pour déterminer le risque d'inondation, il est bien d'évaluer le niveau d'influence du talweg principal d'une vallée. Les débordements de rivières peuvent également déclencher une inondation, car l'eau déborde du canal de la rivière et se répand dans les environs (Faye et al., 2022). Plus la distance augmente, plus le risque diminue, car les zones plus proches

du réseau fluvial sont sujettes à ce risque. La distance par rapport au réseau de drainage a été calculée grâce à l'outil de traitement « Euclidean distance » d'ArcToolbox. Les zones proches du réseau de drainage ont une distance inférieure à 600 m (représente 44,60 % du bassin de Djibonker et 44,25 % du bassin d'Agnak). Celles qui ont une distance comprise entre 600-1200 m sont moins éloignées du réseau principal. Elles occupent respectivement 28,84 % et 27,83 % des superficies des bassins de Djibonker et Agnak (carte 21).

-Elevation et pentes

Les paramètres d'élévation sont déterminants dans l'identification des sites inondables sur un site spécifique. En général, les zones à altitude basse sont susceptibles de devenir des zones d'inondation en raison de l'écoulement de l'eau des zones de haute altitude vers les zones à basse altitude. Dans les bassins étudiés, les basses altitudes sont identifiées dans la partie aval des bassins versants. Les hautes altitudes ont de fortes pentes et influencent remarquablement le ruissellement des eaux. Les pentes les plus raides sont plus sensibles au ruissellement de surface, tandis que les terrains plats sont sensibles à l'engorgement. Les pentes à faible inclinaison sont plus vulnérables aux inondations que les pentes à forte inclinaison. La pluie où l'excès d'eau provenant de la rivière s'accumule toujours dans une zone où l'inclinaison de la pente est généralement faible (Ouma et Tateishi, 2014). Dans les bassins étudiés, les zones à altitude basse sont identifiées dans la partie aval tandis que les zones à haute altitude se trouvent dans la partie amont (carte 21 et 22).

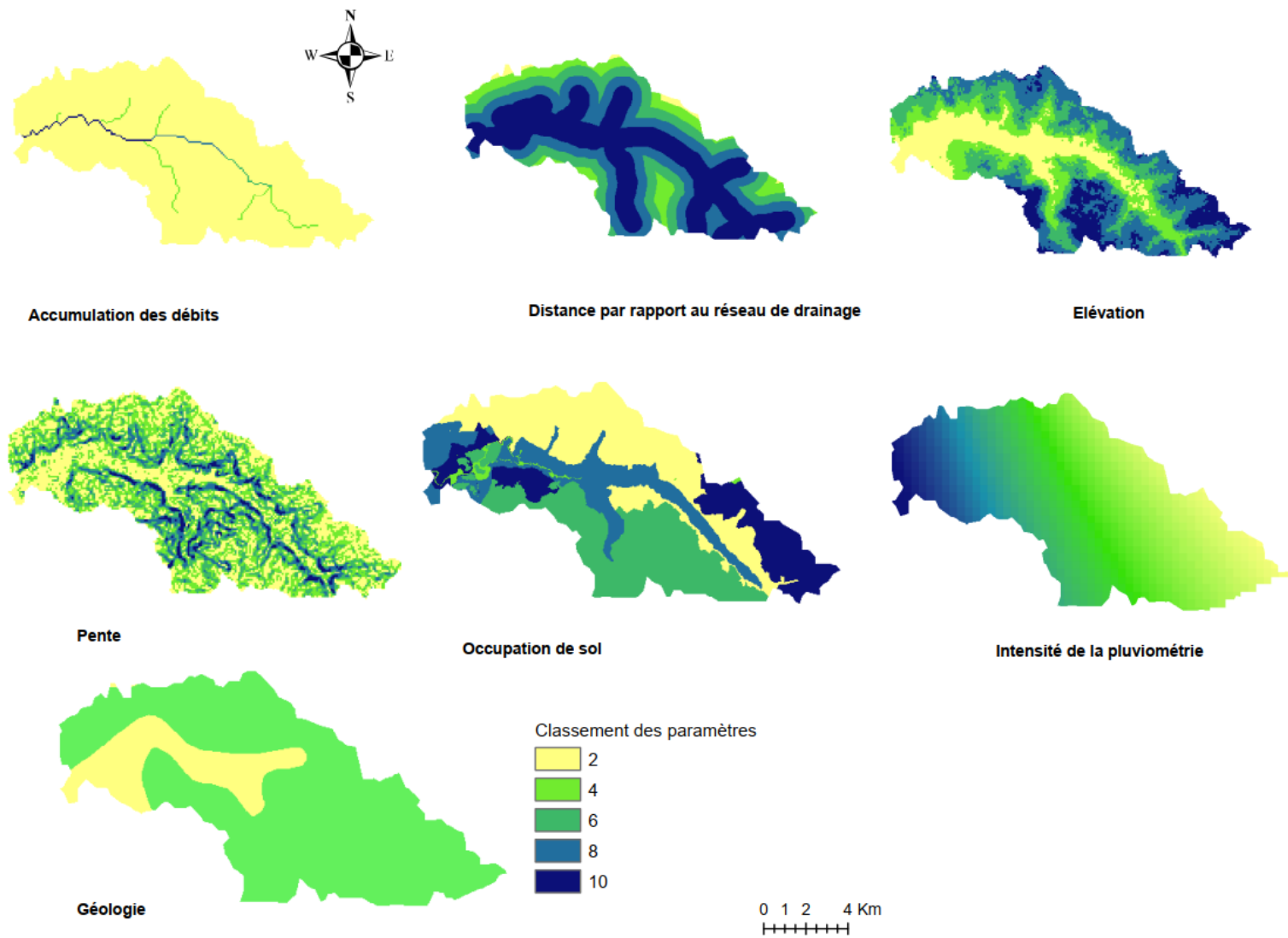
-Utilisation des terres

Les formes d'organisation de l'espace sont aussi susceptibles aux inondations. Les différents usages à des fins d'habitations, agricoles ou d'édifices publics favorisent en partie les risques d'inondations.

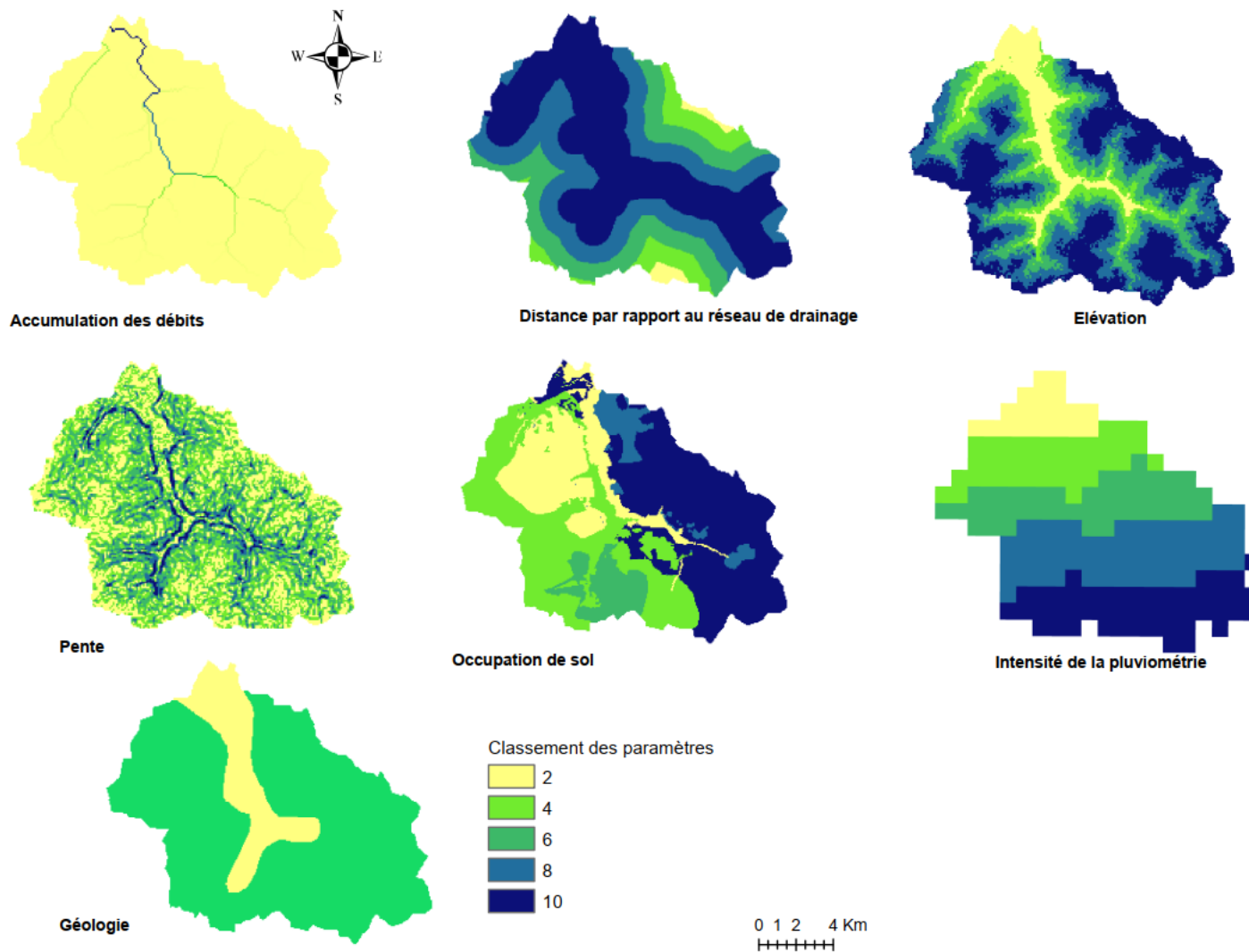
-Intensité des précipitations

Les précipitations annuelles ont été prises en compte et interpolées à l'aide de la pondération de la distance inverse (IDW) afin de créer des données pluviométriques matricielles continues à l'intérieur et autour des limites des bassins versants d'étude. Une détermination de cinq classes a été faite en appliquant un intervalle égal. La valeur 2 a été affectée aux classes de précipitations faibles et les plus importantes la valeur 10. Les niveaux d'intensité des précipitations s'observent d'amont en aval des bassins d'étude (carte 21 et 22). Elles

sont en réalité sujettes aux inondations. En effet, les inondations se produisent très souvent après de fortes précipitations.



Carte 21 : Synthèse des paramètres du modèle FIGUSED à Djibonker



Carte 22 : Synthèse des paramètres du modèle FIGUSED à Agnak

IV.5.2. Risque d'inondation par la méthode FIGUSED-S

Les données intégrées dans le tableau 21 sont obtenues du traitement des cartes thématiques. L'ordre de classement a été fait par niveau d'influence de chaque paramètre sur le risque d'inondation. Ainsi, il est observé que chaque variable a un poids spécifique et une fréquence spécifique. On note que 0,04 % de la superficie du bassin d'Agnak est confrontée à un risque d'inondation très élevé tandis que 28,42 % court un risque élevé. De plus, on relève un risque modéré d'inondation sur une étendue de 42,28 % du bassin-versant d'Agnak (tableau 21). Dans ce bassin versant, les espaces qui sont les plus exposés sont localisés au niveau des espaces destinés aux cultures pluviales et de contre saison.

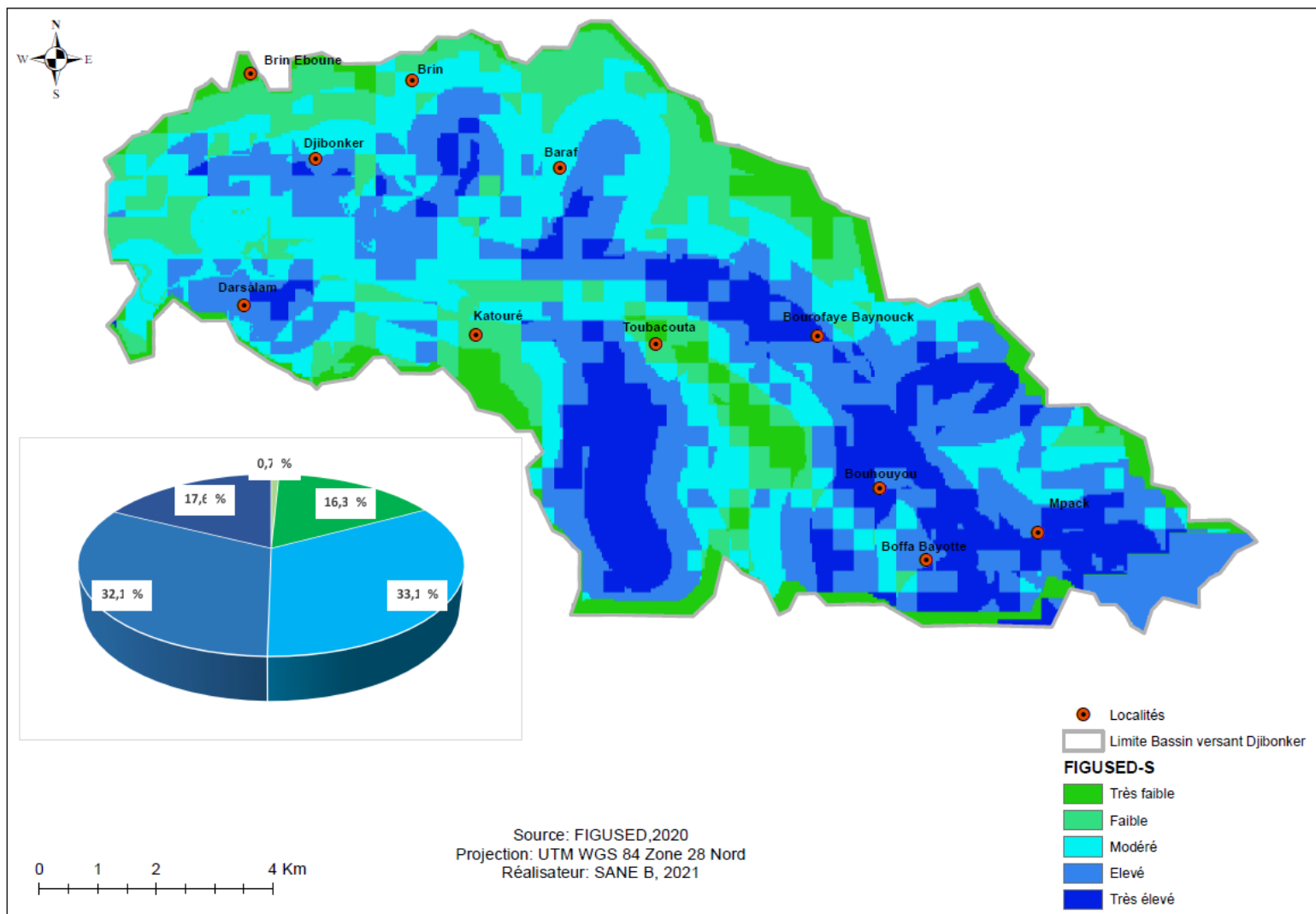
A Djibonker, le risque d'inondation élevé couvre une superficie de 45,5 ha soit 32,10 % de la superficie du bassin susceptible d'être inondée en cas de forte pluie ou d'une crue exceptionnelle (tableau 22). Les parties du bassin de Djibonker où la susceptibilité à l'inondation semble faible (16,37 %) et très faible (0,79 %) sont occupées par les habitations et les cultures arboricoles. Également, l'effet de la topographie y est associé et explique cette faiblesse de rétention d'eau à des périodes ou durée longue. Toutefois, les risques d'enregistrer des inondations dans cette partie n'est pas à minimiser. Il peut dépendre de l'enregistrement d'un épisode ou événement pluvieux important ou extrême.

Tableau 21 : Synthèse des paramètres utilisés pour déterminer l'indice d'inondation bassin versant d'Agnak

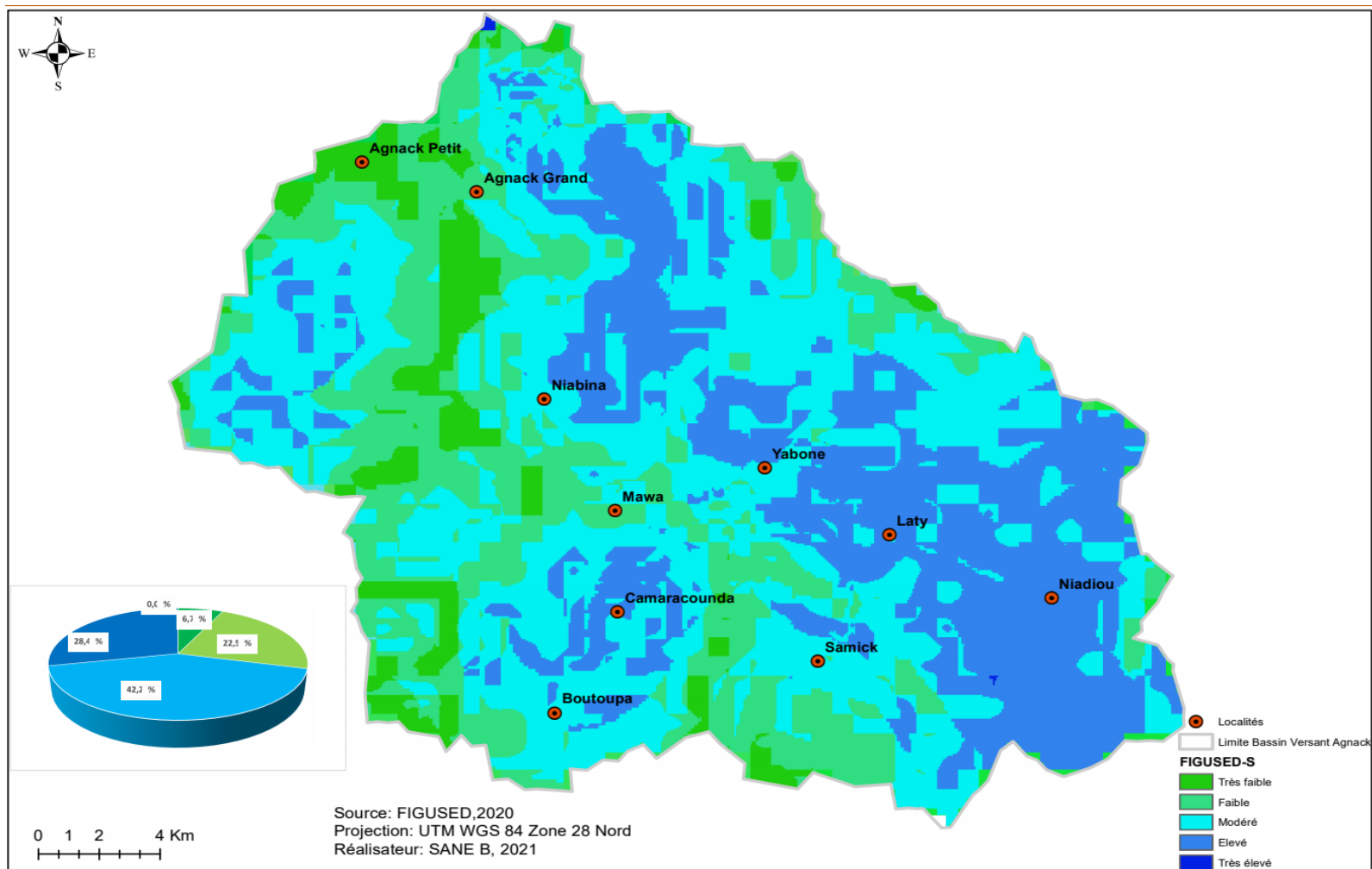
Paramètres	Classes	Classement	Superficie (km ²)	Part (%)
F : Accumulation de flux	0 - 22,78431373	2	146,31	86,56
	22,78431374 - 97,64705882	4	11,64	6,89
	97,64705883 - 250,627451	6	3,48	2,06
	250,6274511 - 572,8627451	8	1,53	0,91
	572,8627452 - 830	10	6,07	3,59
I : Intensité des précipitations	420-425	2	14,20	9,07
	425-430	4	30,31	19,36
	430-435	6	31,88	20,36
	435-440	8	42,92	27,41
	440-448	10	37,25	23,79
G : Géologie	Alluvion fluviale et vase	2	25,75	16,25
	Argiles à foraminifères planctoniques et calcaires et mares	4	132,73	83,75
U : Utilisation du sol	Zones de culture	2	30,64	19,33
	Forêts et Eaux libres	4	48,36	30,51
	Forêts galeries	6	11,15	7,04
	Zone dépressionnaire et marécageuse	8	7,96	5,02
	Savanes boisées parsemées de steppes	10	60,38	38,09
S : Pente	1,08-2,92	10	31,63	19,97
	2,92-4,01	4	41,20	26,02
	4,01-5,37	6	39,31	24,82
	5,37-9,87	8	33,02	20,85
	9,87-17,36	10	13,20	8,34
E : Elévation	1,70-11,63	2	16,27	10,29
	11,63-20,40	4	27,35	17,30
	20,40-27,31	6	32,48	20,54
	27,31-33,21	8	42,80	27,08
	33,21-43,2	10	39,18	24,79
D : Distance par rapport au drainage	<600	10	70,09	44,25
	600-1200	8	44,09	27,83
	1200-1800	6	29,34	18,52
	1800-2400	4	12,37	7,81
	2400-3000	2	2,51	1,59
FIGUSED : Risque d'inondation	34 - 46,38	Très faible	10,43	6,70
	46,38 - 55,66	Faible	35,12	22,55
	55,66 - 64,95	Modéré	65,83	42,28
	64,95 - 83,52	Elevé	44,26	28,42
	83,52 - 823,29	Très élevé	0,07	0,04

Tableau 22 : Synthèses des paramètres utilisés pour déterminer l'indice d'inondation dans le bassin versant de Djibonker

Paramètres	Classes	Classement	Superficie (km ²)	Part (%)
F : Accumulation de flux	0 - 19,5	2	97,9	91,7
	19,51 - 104,8	4	4,0	3,8
	104,8 - 278,0	6	1,39	1,3
	278,0 - 470,7	8	2,08	2,0
	470,7 - 622	10	1,39	1,3
I : Intensité des précipitations	431 - 435	2	16,01	14,01
	435 - 439	4	22,73	19,89
	439- 442	6	29,09	25,45
	442 - 446	8	26,79	23,44
	446- 450	10	19,67	17,21
G : Géologie	Alluvion fluviatile et vase	2	18,67	17,39
	Argiles à foraminifères planctoniques et calcaires et mares	4	88,70	82,61
U : Utilisation du sol	Zones de culture	2	36,53	33,90
	Eaux libres	4	1,26	1,17
	Forêts galeries	6	31,51	29,24
	Zone dépressionnaire et marécageuse	8	20,13	18,68
	Savanes boisées parsemées de steppes	10	18,33	17,01
S : Pente	1,0-1,77	10	28,45	26,42
	1,77-3,42	4	31,16	28,94
	3,42-5,42	6	20,46	19,00
	5,42-6,98	8	17,94	16,67
	6,98-11,83	10	9,66	8,98
E : Elévation	1,70 - 8,60	2	17,59	16,30
	8,60 - 16,05	4	13,40	12,42
	16,05 - 22,12	6	23,98	22,23
	22,12 - 27,37	8	30,31	28,10
	27,37 - 36,90	10	22,59	20,94
D : Distance par rapport au drainage	<600	10	41,80	40,65
	600-1200	8	29,66	28,84
	1200-1800	6	20,44	19,87
	1800-2400	4	9,80	9,52
	2400-3000	2	1,14	1,11
FIGUSED : Risque d'inondation	10-16,36	Très faible	1,12	0,79
	16,36-20,45	Faible	23,2	16,37
	20,45-22,73	Modéré	46,93	33,11
	22,73-29,10	Élevé	45,5	32,10
	29,10-34,5	Très élevé	25,01	17,64



Carte 23 : Sensibilité spatiale aux risques d'inondation dans le bassin de Djibonker



Carte 24 : Sensibilité spatiale aux risques d'inondation dans le bassin d'Agnak

IV.6. Évaluation du potentiel d'eau souterraine dans les bassins d'étude

Le développement actuel des territoires et la forte mobilisation des communautés autour des activités agricoles (culture de rente et maraîchères) associé aux conditions hydro-climatiques dégradantes contribuent au déséquilibre de l'alimentation en eau des nappes. Ces actions perturbent la reconstitution des eaux souterraines et réduisent la disponibilité des eaux souterraines. Il est donc impératif de faire une estimation quantitative des ressources en eau souterraine disponibles à l'échelle d'un bassin et d'un sous-bassin. A cet égard, la cartographie de prospection des eaux souterraines peut jouer un rôle prépondérant (Sahoo *et al.*, 2015). La zone de recharge des eaux souterraines est la zone où l'eau de pluie s'infiltré dans le sol puis se transforme en eau souterraine. Pour déterminer la zone potentielle de recharge des eaux souterraines, la cartographie et traitement à partir des SIG doivent être utilisés. Les paramètres qui gouvernent la recharge des eaux souterraines tels que les précipitations, la nature de l'aquifère, l'utilisation des terres et le type de sols peuvent facilement être définis comme des données spatiales dans un environnement SIG.

IV.6.1. Les différents paramètres de la prospection des eaux souterraines

Dans cette section, quelques paramètres ont été considérés comme déterminant dans l'évaluation du potentiel et de la disponibilité en eau souterraines dans les bassins versants d'étude. Il s'agit de la géologie, de la géomorphologie, de la pente, de la pédologie, de la densité de linéament et de drainage, de l'occupation des sols et de la pluviométrie. Les variables mobilisées ont chacune un poids spécifique sur la connaissance des eaux souterraines.

La géologie qui reçoit une valeur d'influence élevée du potentiel des eaux souterraines, tout le contraire d'autres groupes lithologiques de nature colonnaire, massive et compacte (Faye *et al.*, 2021). Elle contribue également à mieux connaître le potentiel en eau des eaux souterraines.

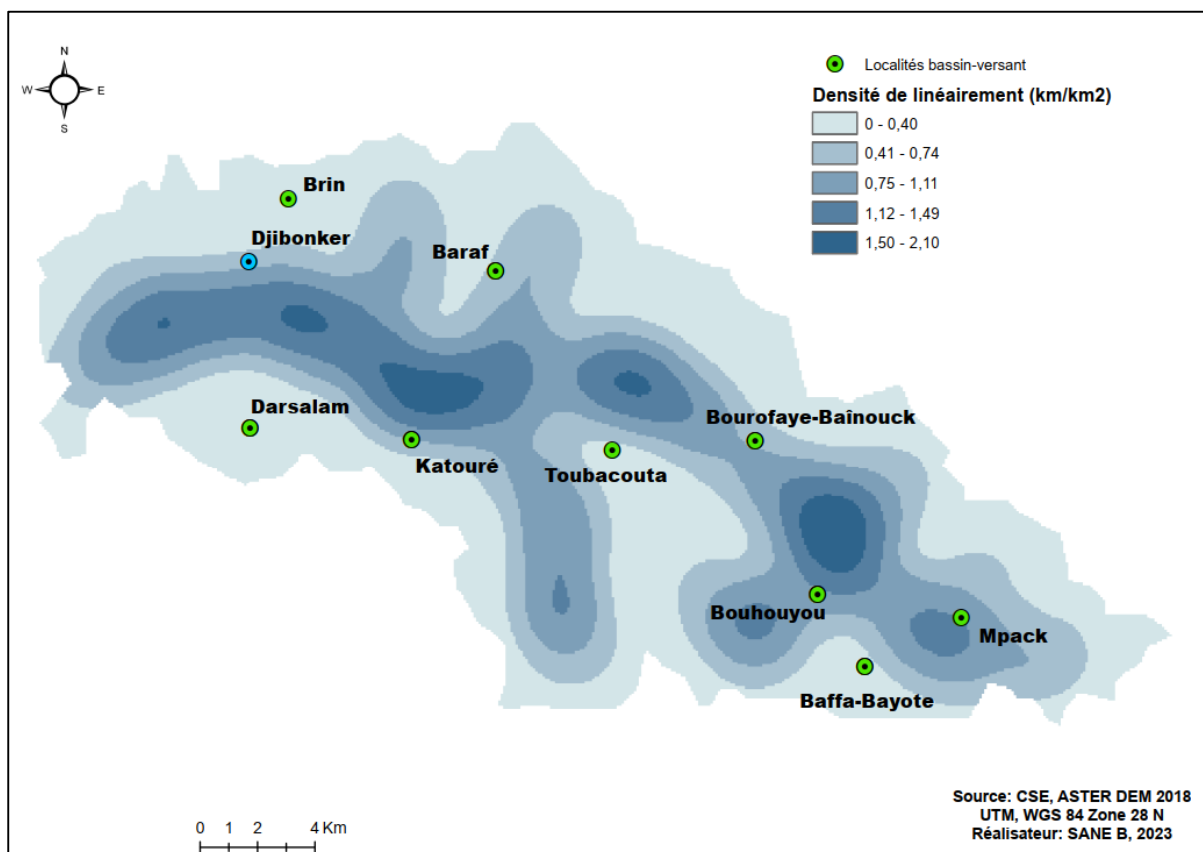
La géomorphologie d'une région est un facteur important pour évaluer le potentiel et la perspective des eaux souterraines, car elle contrôle leur mouvement sous la surface. Les territoires des bassins de Djibonker et d'Agnak reposent sur des formations de butes résiduelles, de terrasses colluviales-alluviales et de vallons fonctionnels. On y identifie aussi des « formations de fleuve » de type vasières qui jouxtent des peuplements végétaux hydrophiles. Ces unités géomorphologiques sont déterminantes à la prospection du potentiel en eau souterraine dans les bassins hydrographiques.

Les paramètres pédologiques : le fonctionnement des sols est très lié aux conditions hydro-climatiques et au mode d'usage qu'ils subissent. Le sol est un continuum spatial et les interactions qu'il entretient avec l'eau et les végétaux sont influencées par sa position dans l'espace (Degré *et al.*, 2011). La variation des unités de sols dans les territoires étudiés explique une distribution spatiale des niveaux d'infiltration des eaux.

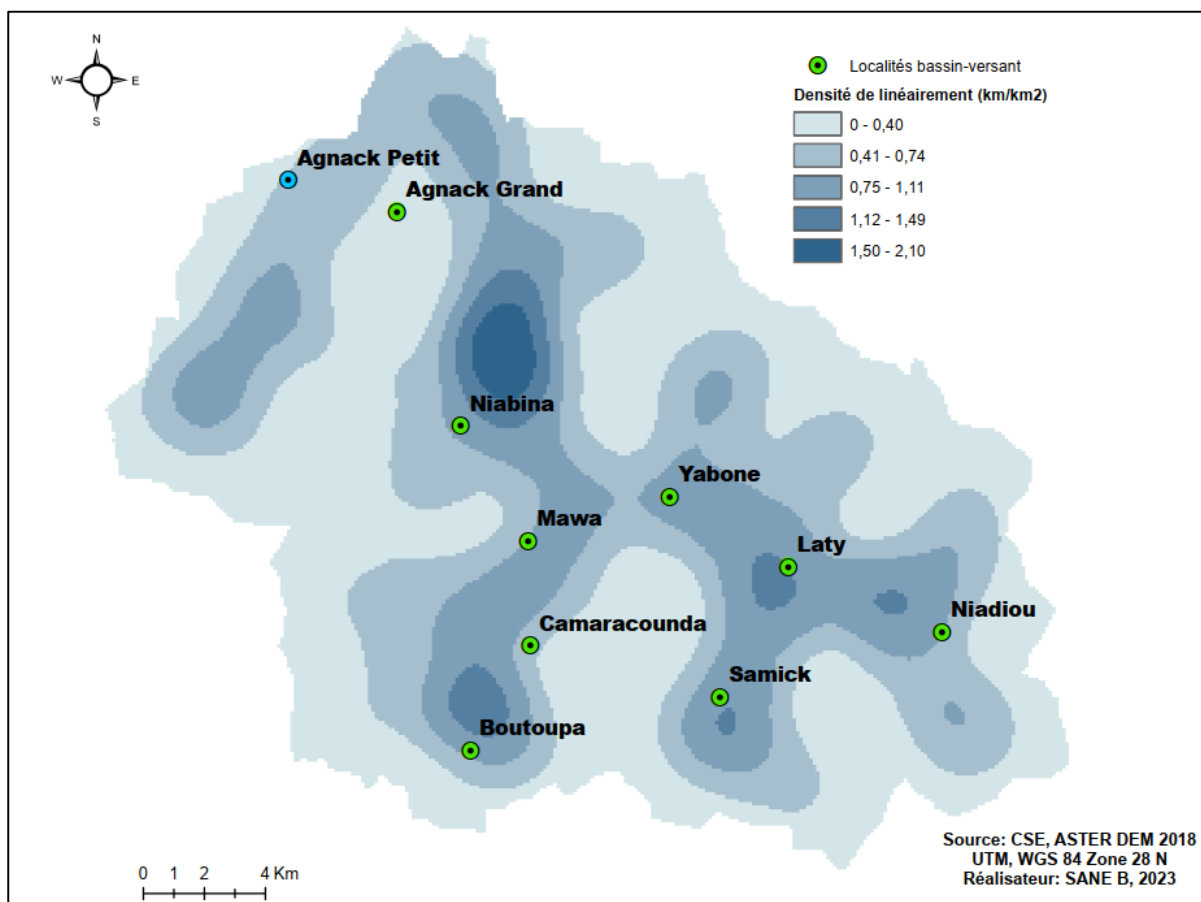
Le modèle numérique de terrain et la pente des bassins étudiés concourent également à l'évaluation des eaux souterraines. Les zones à faible pente ont tendance à retenir l'eau plus longtemps et ont une susceptibilité élevée à l'infiltration avec une grande probabilité de mouvement des eaux. Dans les endroits à faible pente, l'infiltration dans le sol est plus fréquente parce que le volume d'eau superficielle est moindre (Yacoub, 2021). Ainsi, l'infiltration constitue un facteur hydrologique efficace pour la recharge des eaux souterraines.

La densité de linéairement est une caractéristique géologique importante qui montre la pénétration des précipitations dans le sol. Les linéaments sont des fractures linéaires naturelles sous la forme de défauts, articulations et fractures, qui peuvent être directement interprétés à partir d'images satellites (Agarwal et Garg, 2015). Dans les zones où la densité de linéament est élevée, l'alimentation en eau de la nappe souterraine est relativement importante. Dans les zones où la densité est faible, l'approvisionnement en eau souterraine est moindre. De plus, les linéaments influencent la porosité secondaire et la perméabilité. A partir du modèle numérique de terrain, les densités de linéaments des bassins ont été déterminées à partir du logiciel Arcgis. Le procédé de calcul se fait à partir de l'extension '*line density*' dans la boîte à dialogue 'Arc Toolbox'. Le traitement permet d'identifier les zones susceptibles de réceptionner des volumes d'eau importants sur l'étendue d'un bassin versant. Le résultat de la cartographie produite indique des zones à densité de linéaments hétérogènes sur l'étendue des bassins versants étudiés.

La densité de linéaments de la zone d'étude varie de 0,40 à 2,10 km /km² (carte 25). La note la plus élevée 1,50-2,10 km /km² a été attribuée aux sites à plus grande densité de linéaments localisés dans la partie nord de la zone d'étude car ils sont les indicateurs directs de potentialité des eaux souterraines. De même, la partie sud de la zone d'étude qui s'est avérée avoir les plus faibles densités de linéaments a reçu la note la plus basse 0,40 km /km².

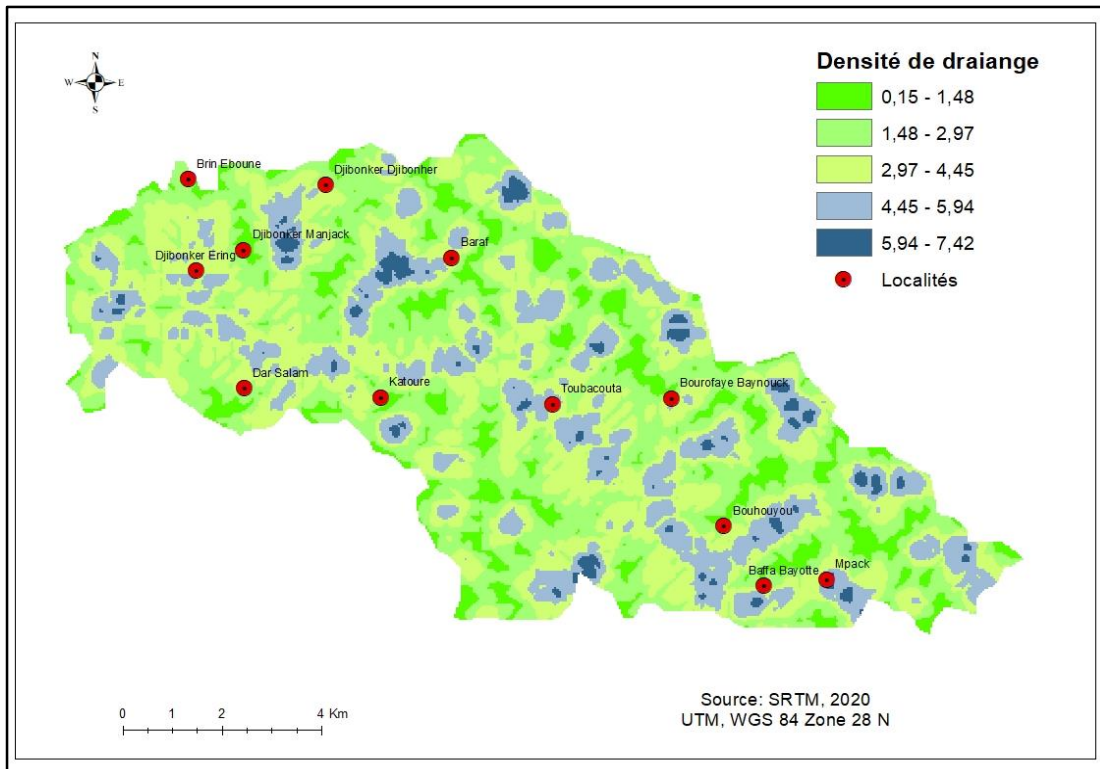


Carte 25 : Densité des couches linéaires dans le bassin de Djibonker

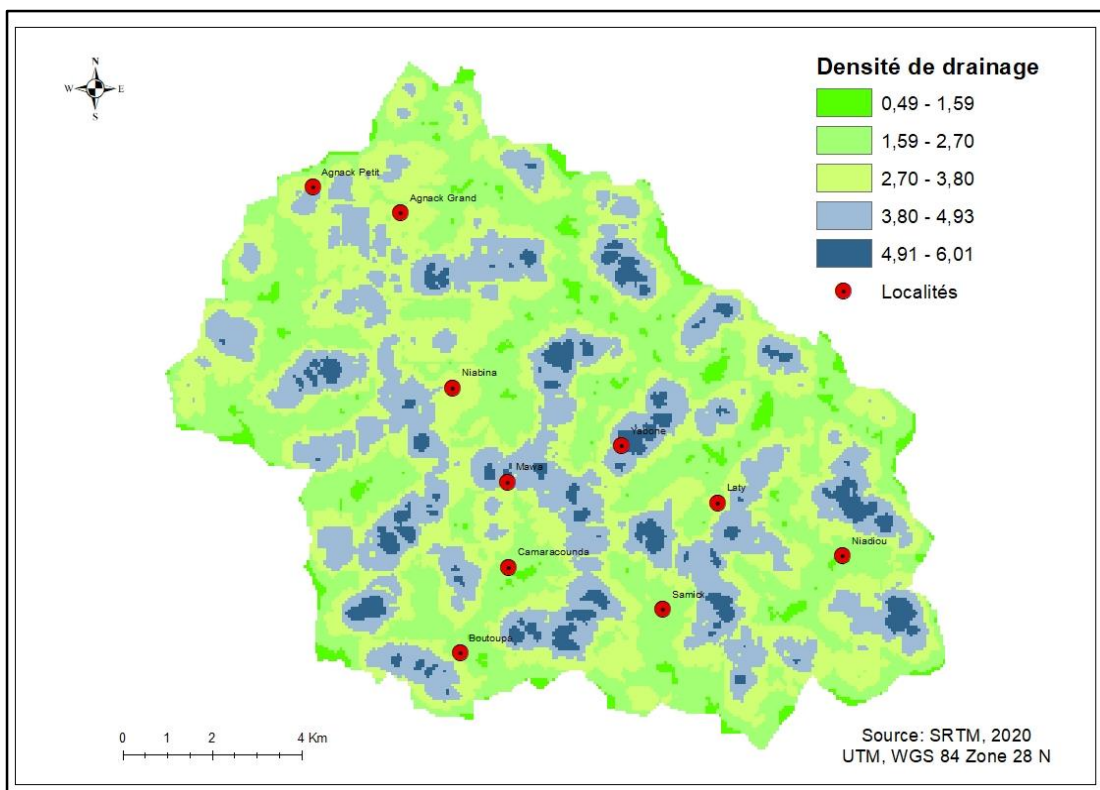


Carte 26 : Densité des couches linéaires dans le bassin d'Agnak

La densité de drainage des eaux par bassin versant (km/km^2) exprime la proximité de l'espacement des canaux des cours d'eau, fournissant ainsi une mesure quantitative de la longueur moyenne des canaux des cours d'eau de l'ensemble du bassin (Strahler, 1964 ; Singh *et al.*, 2014 ; Faye *et al.*, 2021). Les densités de drainage les plus élevées sont comprises entre $4,91\text{km}/\text{km}^2$ et $6,01\text{ km}/\text{ km}^2$ dans le bassin de Agnak et $5,94\text{ km}/\text{ km}^2$ et $7,42\text{ km}/\text{ km}^2$ dans le bassin de Djibonker. Pratiquement, plus de 75 % des superficies des bassins ont des densités faibles comprises entre 1 et $2,97\text{ km}/\text{ km}^2$ (carte 27). Ces densités faibles à moyennes s'expliquent par la nature savanicole des paysages des bassins de Djibonker et d'Agnak



Carte 27 : Densité de drainage dans le bassin versant de Djibonker



Carte 28 : Densité de drainage dans le bassin versant d'Agnak

IV.6.2. L'assignation de poids des cartes par méthode multicritères AHP

Après l'assignation des poids des cartes, l'outil « weighted Sum » a été utilisé pour superposer les cartes thématiques. Les cartes thématiques utilisées ont chacune un rôle spécifique sur la détermination des eaux souterraines dans le bassin versant. Les poids attribués aux différentes couches thématiques sont obtenus sur la base de la priorisation des couches par la méthode multicritères analytique. Les poids élevés (7) ont été attribués aux paramètres de géologie et de précipitations qui sont généralement les plus déterminants à la prospection des eaux souterraines (tableau 23). Les types de sols (5) et l'état de la couverture des sols (4,5) sont les deuxièmes paramètres considérés importants à la prospection des eaux souterraines. Les paramètres restants sont consignés dans le tableau 23.

Tableau 23 : Critères d'attribution de poids des cartes thématiques des bassins étudiés

Non.	Thème	Base de la catégorisation	Poids assigné
1	Géologie	Type de roche, caractère d'altération, joints, fractures, <i>etc.</i>	7,5
2	Sol	Perméabilité, porosité et texture	5
3	Utilisation terre	Type, statut et état de la couverture terrestre	4,5
4	Densité de drainage	Valeur de la densité de drainage	3,5
5	Densité des couches linéaires	Valeur linéaire	4
6	Pluviométrie	Quantité et distribution spatio-temporelle	7
7	Pente	Pourcentage de la pente	2,5
8	Géomorphologie	Type de terrain	3

Les poids attribués à chaque couche thématique reposent sur leur influence à la prospection des eaux souterraines. Les poids normalisés des 8 couches thématiques ont été agrégés dans l'environnement SIG via l'outil « weighted-Sum ». Les valeurs des indices sont obtenues sur la base de l'agrégation de certaines cellules intégrées dans le travail pour mieux le finaliser. Les poids affectés à chaque couche thématique ont été calculés par la moyenne totale de la colonne pour obtenir un poids normalisé assigné pour chaque thème (tableau 24).

Tableau 24 : Comparaison par paires entre les couches thématiques des bassins d'étude

	GG	Sol	UT	DD	LD	Pmm	SL	GM	Moyenne géométrique	Poids normalisé
GG	7/7	7/5	7/4.5	7/3.5	7/4	7/7	7/2.5	7/3	1,73	0,19
Sol	5/7	5/5	5/4.5	5/3.5	5/4	5/7	5/2.5	5/3	1,24	0,14
UT	4.5/7	4.5/5	4.5/4.5	4.5/3.5	4.5/4	4.5/7	4.5/2.5	4.5/3	1,11	0,12
DD	3.5/7	3.5/5	3.5/4.5	3.5/3.5	3.5/4	3.5/7	3.5/2.5	3.5/3	0,86	0,10
LD	4/7	4/5	4/4.5	4/3.5	4/4	4/3.5	4/2.5	4/3	0,99	0,11
Pmm	7/7	7/5	7/4.5	7/3.5	7/4	7/7	7/2.5	7/3	1,73	0,19
SL	2.5/7	2.5/5	2.5/4.5	2.5/3.5	2.5/4	2.5/3.5	2.5/2.5	2.5/3	0,62	0,07
GM	3/7	3/5	3/4.5	3/3.5	3/4	3/3.5	3/2.5	3/3	0,74	0,08
Total de la colonne	-	-	-	-	-	-	-	-	9,02	-

IV.6.3. Variation des eaux souterraines dans les bassins versants d'étude

Les cartes 29 et 30 de prospection montrent une variabilité du potentiel en eau sur l'étendue des bassins versants. Les zones de prospection à indices « excellent » sont celles qui jouxtent les vallées ou cuvettes de décantation.

Dans le bassin versant de Djibonker, les zones de prospection à indices « excellent » couvrent une superficie de 3,9 km² soit 4 % du territoire du bassin (tableau 25). Il s'ensuit des zones de prospection indices « très bon et modéré » qui occupent respectivement 30,31 km² soit 30,4 % et 32,72 km² soit 32,8 %. Les zones de prospection à indices « très pauvre et pauvre » occupent 20,25 soit 20,3 km² et 12,59 km² soit 12,6 %.

Tableau 25 : Zones de prospection des eaux souterraines à Djibonker

N°	GWPI	Indices de prospection des eaux souterraines	Superficie (km ²)	Pourcentage
1	0.12–0.19	Très pauvre	20,25	20,3
2	0.19–0.25	Pauvre	12,59	12,6
3	0.25–0.32	Modéré	32,72	32,8
4	0.32–0.38	Très bon	30,31	30,4
5	0.38–0.45	Excellent	3,97	4,0

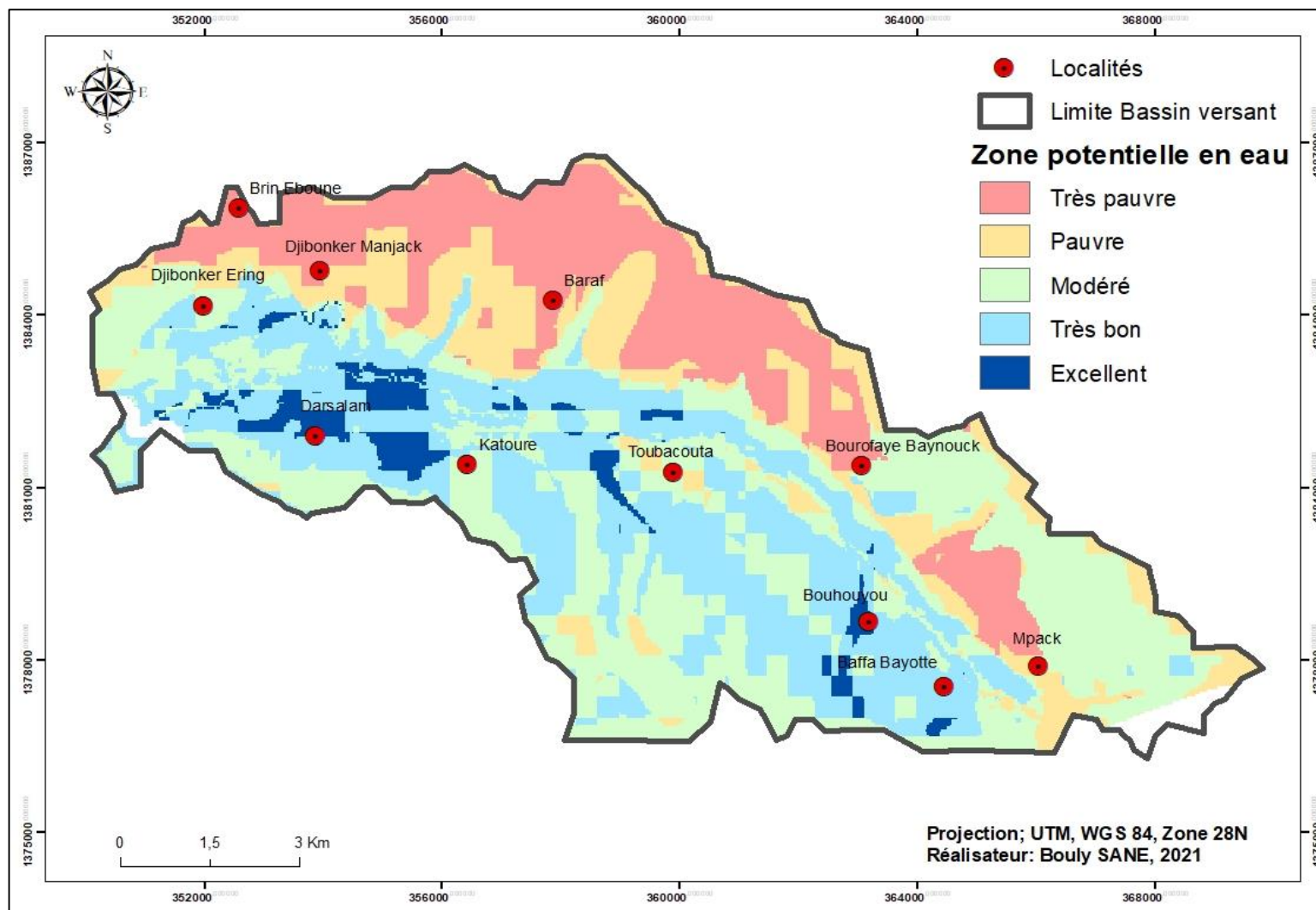
Dans le bassin d'Agnak, on observe une légère variation des zones de prospection d'eau souterraine. La zone de prospection à indice « excellent » occupe une superficie de 5,46 km² soit 3,50%. On constate une superficie de prospection à indice excellent plus large dans ce bassin contrairement à celui de Djibonker. Les superficies de prospection à indices

« très bon et modérée » sont de 25,08 km² soit 16,09 % et 47,95 km² soit 30,76 % (tableau 26). Les dernières catégories « zone très pauvre et Pauvre » concernent 19,67 km² soit 12,62 % et 57,73 km² soit 37,03 % de la superficie du bassin versant.

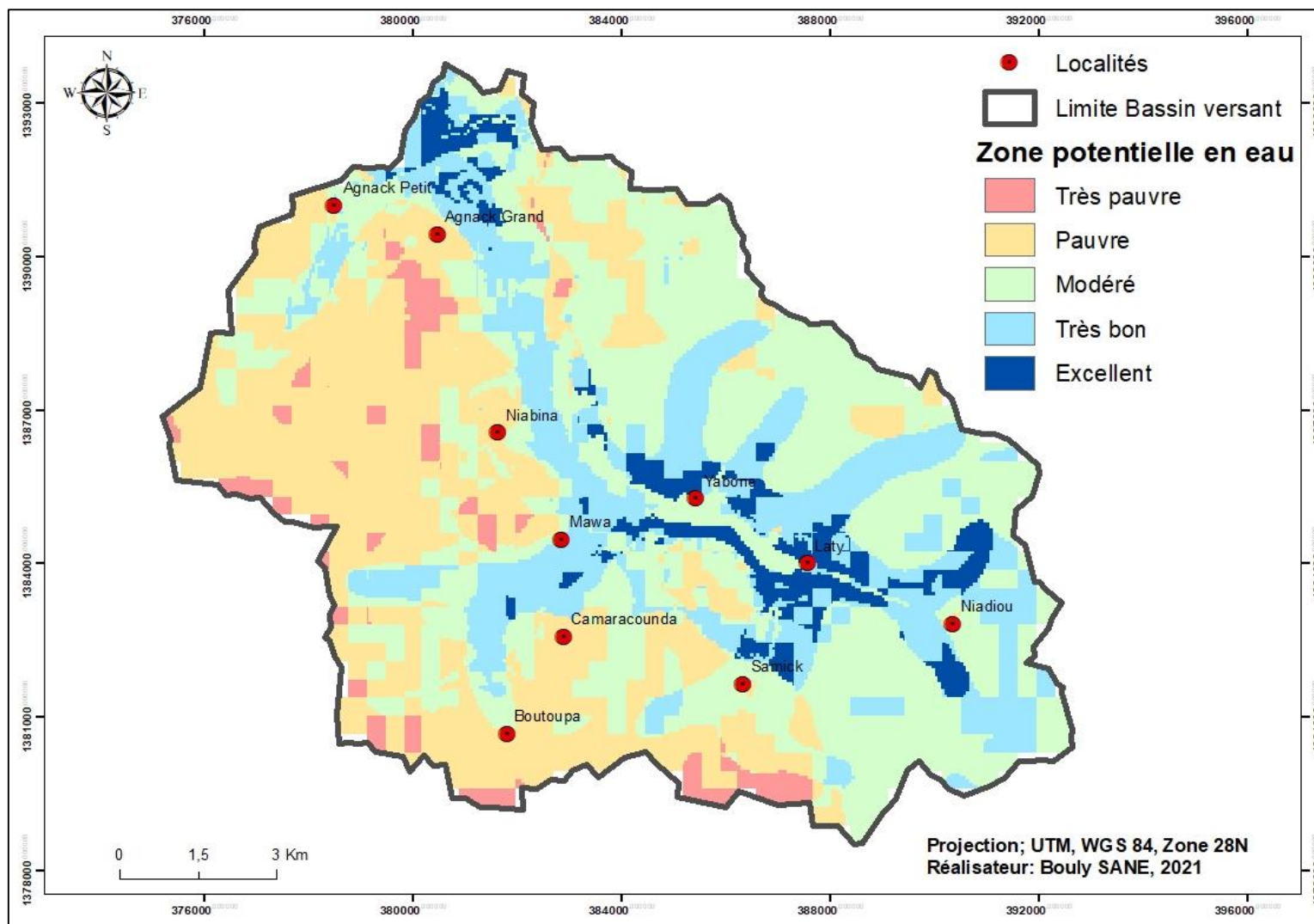
Tableau 26 : Zone de de prospection des eaux souterraines à Agnak

N°	GWPI	Indices de prospection des eaux souterraines	Superficie (km ²)	Pourcentage
1	0.15–0.21	Très pauvre	19,67	12,62
2	0.21–0.27	Pauvre	57,73	37,03
3	0.27–0.33	Modéré	47,95	30,76
4	0.33–0.39	Très bon	25,08	16,09
5	0.39–0.46	Excellent	5,46	3,50

Les cartes 29 et 30 de prospection indiquent que les parties amont des bassins, à proximité des exutoires, disposent de potentiels énormes en eau souterraine. On déduit de ces résultats cartographiques, que les zones où la concentration de l'eau est plus longue disposent de plus d'infiltration de l'eau pour alimenter la nappe souterraine. Le potentiel en eau à indice pauvre est plus remarqué au niveau des versants et des talus, zone où l'importance de la pente favorise un ruissellement plus rapide (carte 29). En plus, la nature des sédiments ferrugineux, sur une grande partie, présente une faible exposition aux eaux souterraines. Les parties méridionales des bassins présentent une très bonne potentialité en eaux souterraines. Quant aux parties septentrionales du bassin, elles présentent une très bonne voir excellente exposition aux eaux souterraines (carte 29). Les localités de Darsalam, Katouré, Toubacouta et Boffa-Bayotte offrent plus de potentialités en eau souterraine. Dans le bassin de d'Agnak, les localités où l'exposition aux eaux souterraines est très bonne à excellente sont Yabone, Laty, Mawa et Samick. Pratiquement, ce sont les zones les moins peuplées des bassins et où la dynamique des activités agricoles est moins rapide que les localités environnantes des bassins versants de Djibonker et Agnak.



Carte 29 : Répartition spatiale des potentialités en eau dans le bassin versant de Djibonker



Carte 30 : Répartition spatiale des potentialités en eau dans le bassin versant d'Agnak

IV.6.4. Etats des sources de collectes d'eau souterraines et risques de pression sur la ressource en eau.

Dans ce contexte de mutations environnementales, on note des prélèvements d'eau relativement importants pour les usages socio-économiques des populations. Les plus importants modes de collectes identifiés sont destinés à l'irrigation et à la consommation domestique. Il s'agit, le plus souvent de sources de mini-forages solaires, des forages communautaires motorisés ou électriques (photo 7), qui assurent la distribution de l'eau de boisson dans les villages. Les puits traditionnels et motorisés, comme source de collecte d'eau sont identifiés le plus dans les villages de la commune de Boutoupa-Camaracounda. A ces ouvrages, s'ajoutent les bornes fontaines, qui ont renforcé sensiblement l'adduction en eau dans les localités des bassins d'étude.



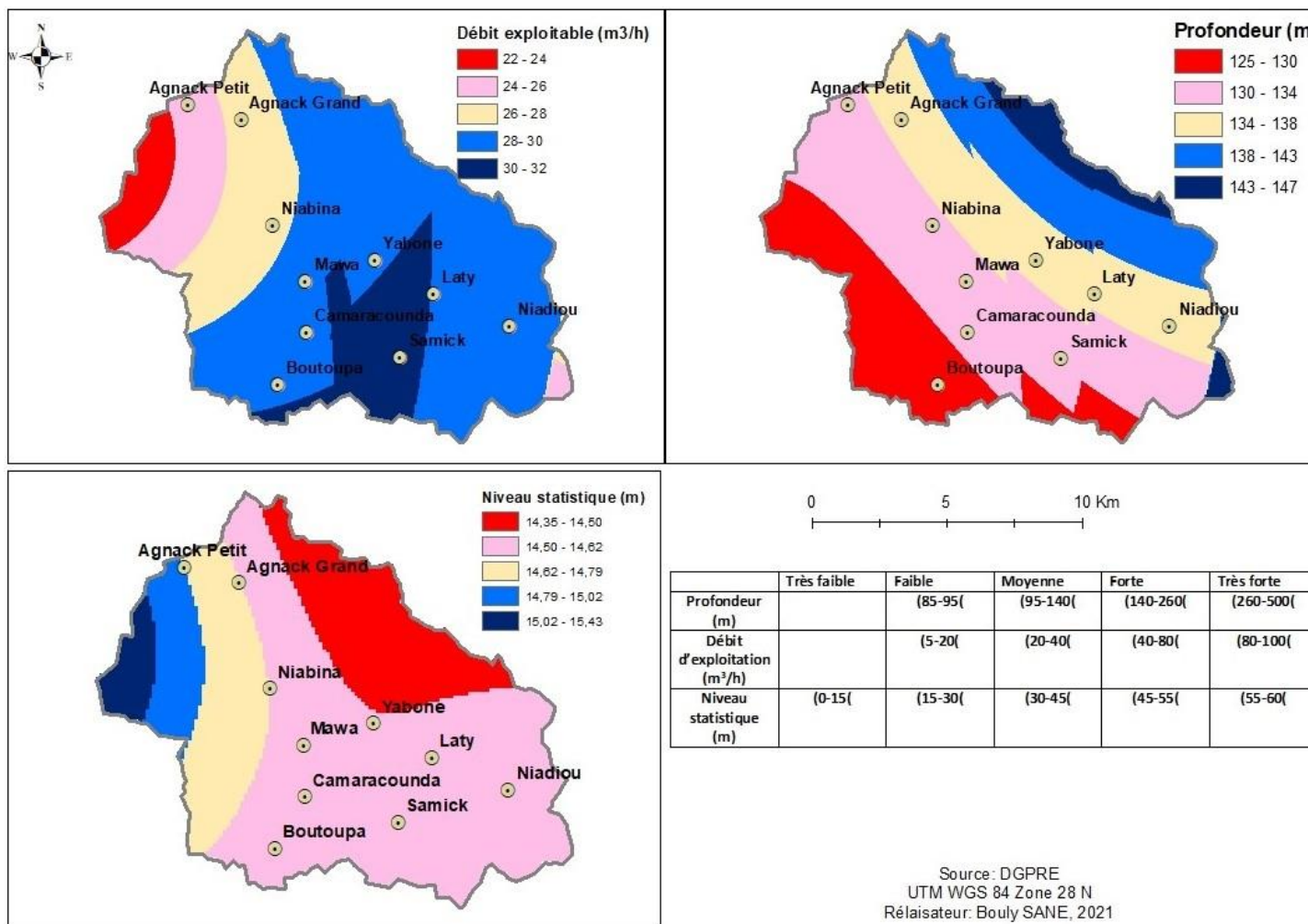
Photo 7 : (A) Puits à margelle traditionnelle destinée aux usages domestiques à Agnak-Grand (novembre, 2020) ; (B) mini-forage solaire à Baroufaye-Bainouck (juillet, 2022) et (C) Forage communautaire à Camaracounda (juin, 2023).

Toutefois, l'état de ces points de collecte est relativement déploré par les populations enquêtées. Certains puits comme sur la photo (7-A) sont dans un état critique et l'eau collectée d'une qualité douteuse. Les forages solaires sont localisés le plus dans les villages de Bourofaye-Bainouck (photo 7-B) où l'agriculture irriguée est très développée. Les forages communautaires dénombrés, comme celui implanté dans le village de Camaracounda (photo 7-C), desservent en eau un bon nombre des villages de la commune de Boutoupa-Camacounda.

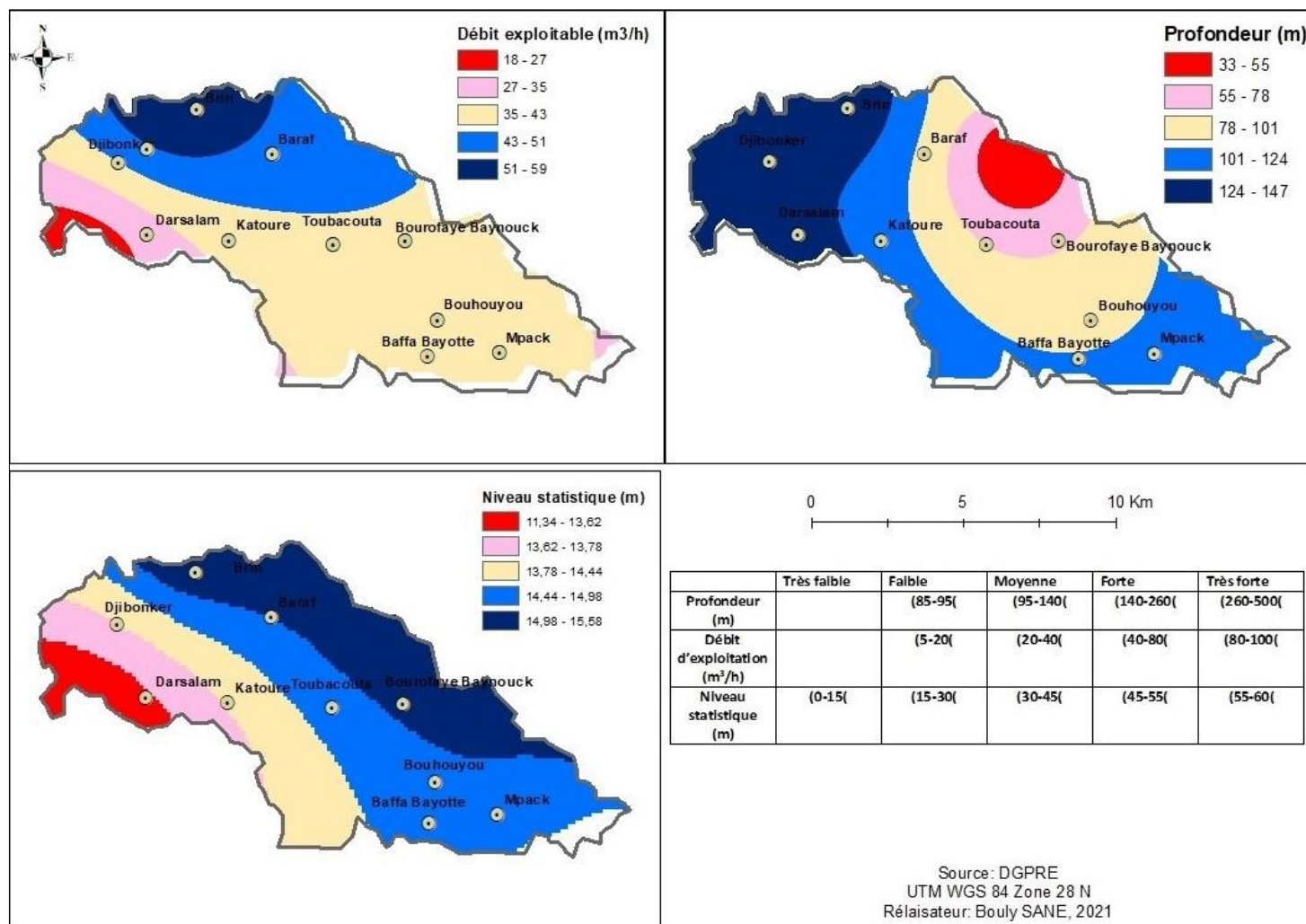
Dans ce cadre de l'évaluation de l'état des sources de collecte d'eau souterraines et de l'appréciation du potentiel en eau des ouvrages hydrauliques, une interpolation est faite à partir des données piézométriques des forages collectés par la DGPPE. Les cartes sont réalisées à partir des données du débit d'exploitation, de la profondeur de la nappe et du niveau statique. On observe sur ces cartes des niveaux d'exploitation faible, moyen et fort sur les deux bassins versants.

A Agnak, la profondeur des forages piézométriques est moyenne à élevée sur l'étendue du bassin. Les valeurs élevées, correspondant à la profondeur forte 143-147 m, se trouvent dans la partie orientale du bassin versant. On note également dans cette partie des débits d'exploitation moyens compris entre 20-40 m (carte 31). Pratiquement, les profondeurs observées sont comprises dans l'intervalle 95-140m comme étant des valeurs moyennes. Pour les débits d'exploitation, des ouvrages piézométriques sont aussi dans l'intervalle d'exploitation moyen 20-40 m, où le débit maximal se situe entre 30 et 32 m. Il est en de même pour le niveau statique des ouvrages de la nappe souterraine exploitée. Ces niveaux sont classés très faible voir faible sur une portion du territoire. Les niveaux statiques sont compris entre 14,35-15,43 m.

A Djibonker, les profondeurs de la nappe souterraine exploitée sont comprises entre 33 et 147m. Les fortes profondeurs d'exploitation de la nappe (124 à 147 m) sont enregistrées à hauteur des terroirs de Brin, Djibonker et Darsalam (carte 32).



Carte 31 : Débits, niveaux statiques et profondeurs des eaux de la nappe exploitée dans le bassin versant d'Agnack



Carte 32 : Débits, niveaux statiques et profondeurs des eaux de la nappe exploitée dans le bassin versant de Djibonker

Conclusion du chapitre IV

Le potentiel hydrique a été déterminé à travers des outils de la géomatique à l'échelle des bassins versants étudiés. La méthode par gravimétrie a permis de faire ressortir l'évolution spatio-temporelle des ressources en eau de surface. On note, ainsi, des variations de stockage entre 2003 et 2015 dans les stations étudiées. Ces variations de stockage ont été plus notées dans la partie nord de la Basse-Casamance, qui se distingue par des stockages d'eau relativement faibles sur toutes les échelles temporelles. L'échelle mensuelle se caractérise par des indices de stockage relativement importants et une meilleure alimentation des différentes nappes souterraines. Sur les échelles de temps saisonnières (SPI et SPEI), les variations des eaux souterraines résultent de l'effet combiné de la décharge des nappes phréatiques en saison sèche et de leur recharge en saison des pluies. La modélisation du risque d'inondation montre également la susceptibilité relativement élevée aux risques d'inondation dans les bassins versants de Djibonker et d'Agnak. On note que 30,33 % soit 42,99 ha et 24,6 % des superficies des bassins de Djibonker et Agnak sont confrontés aux risques d'inondation très élevés en cas d'une crue ou d'une pluie torrentielle. On note aussi des potentialités relativement importantes en eau souterraine sur une superficie de 3,9 km² dans le bassin de Djibonker et une superficie de 5,46 km² dans le bassin d'Agnak.

L'étude de l'évolution hydrologique des bassins-versants par SIG est très prometteuse et aiderait à l'évaluation et à la prévision des risques d'inondation et le suivi de l'évolution des nappes souterraines. Il est également, important de déterminer le potentiel de ruissellement des bassins-versants dans ce contexte de variabilités climatique corrélés aux mutations environnementales et socioéconomiques.

CHAPITRE V : LE MODELE HEC-HMS : UNE CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL D'EAU RUISSELE DANS LES BASSINS VERSANTS

Ce chapitre est consacré à l'analyse du ruissellement à l'échelle des deux bassins versants à partir du modèle hydrologique HEC-HMS (Pluie-débit). L'absence de sites de mesure ponctuelle et ou régulière et de données hydrométriques permet aux hydrologues de faire recours aux modèles globaux pour ressortir différents scénarii de fonctionnement des bassins. Il est admis que les défis actuels s'orientent plus sur la prévision et les modes de gestion collégiale des eaux à l'intérieur des bassins versants. On aborde ce chapitre par une description des deux types de modèles (empiriques et conceptuels), un rappel du mode de fonctionnement du modèle, de la méthodologie de calibrage et des résultats obtenus. Les deux bassins sont considérés comme "vierges" c'est-à-dire qu'ils n'ont pas fait l'objet d'une étude hydrologique ponctuelle. Des études effectuées dans ce bassin ne sont pas tout à fait réalisées à des échelles temporelles longues.

Le modèle HEC-HMS repose sur une calibration des paramètres de traitements à savoir la pluviométrie, l'évapotranspiration et l'accumulation de la fonte.

V.1. Description du modèle HEC-HMS

HEC-HMS est un outil conceptuel de modélisation. Il est développé par l'US Army Corps of Engineers et peut être téléchargé librement sur le site : <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser le bassin en plusieurs parties appelées sous-bassins, considérées comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés.

Les modèles globaux non paramétriques sont des outils de prévision et de gestion des bassins versants fluviaux. Les modèles hydrologiques sont des outils indispensables pour comprendre la réponse hydrologique d'un bassin versant (Hemza *et al.*, 2022). Il existe plusieurs types de modèles utilisés en hydrologie.

Quel modèle conceptuel pour nos deux bassins d'étude ?

L'un des objectifs principaux de la modélisation est d'acquérir une meilleure compréhension des processus opérant sur le bassin et de leur évolution en fonction des changements auxquels celui-ci peut être soumis (Gal, 2016). Aujourd'hui, l'évaluation des

ressources en eau disponibles dans un bassin versant exige de trouver des approches plus adéquates et répondant aux caractéristiques des bassins versants mais aussi aux types et à la qualité de données disponibles.

La modélisation est une des principales méthodes permettant l'estimation de variables hydrologiques (Camille, 2019). Elle n'est donc qu'une représentation simplifiée du système physique permettant de simuler le comportement hydrologique d'un bassin à partir d'équations mathématiques.

La particularité des bassins versants est qu'ils constituent des surfaces de confluence de plusieurs types de terroirs ayant des spécificités physiques et historiques. Adapter un modèle dans ces types d'espaces ou environnements demande la prise en compte de plusieurs éléments. Il s'agit des caractéristiques morphométriques (pente, forme, longueur et largeur, etc.) et des caractéristiques liées aux occupations humaines (bâti, terres de cultures, sites d'activités intensives, etc.)

L'objectif de ce chapitre est de développer une approche permettant de comprendre le comportement des petits-bassins ruraux non jaugés face à la sollicitation pluviométrique dans un contexte de changement climatique afin d'évaluer l'impact des modifications des unités paysagères identifiées sur le système hydrologique. Plusieurs modèles s'offrent à notre étude, mais l'important est de bien les adapter à nos objectifs de recherche. Nous avons retenu de travailler avec le modèle HEC-HMS ; un modèle qui a deux principaux buts : la prévision et la gestion.

Les modèles sont représentés par classes en fonction des processus d'entrée des paramètres et des types de paramètres à introduire dans le modèle ou dont le modèle a besoin pour bien assurer son routage. Pour ce qui est de notre choix, assujetti par les types de données disponibles, nous associons les deux types de modèles, à savoir empirique et conceptuel.

✓ **Modèles empiriques**

Les modèles empiriques permettent d'établir des relations entre les variables d'entrée (précipitations, températures) et les variables de sorties (débit journalier) à partir de séries chronologiques sans prise en compte des caractéristiques du bassin versant (Camille, 2019).

✓ **Modèles conceptuels**

La modélisation conceptuelle décompose le fonctionnement hydrologique en plusieurs processus hydrologiques de façon simple sans utiliser les paramétrisations des lois

physiques de ces processus (Camille, 2019). Les modèles conceptuels comprennent généralement une fonction de production permettant la répartition des termes du bilan en eau (volume de ruissellement de surface, volume évaporé, volume écoulé) et une fonction de transfert permettant la simulation de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin.

V.2. Méthodologie de création du modèle sous HEC-HMS

L'interface du modèle HEC-HMS comprend plusieurs fonctions qui partent du hétérogramme des précipitations à l'hydrogramme des crues. A partir du modèle numérique de terrain, de l'occupation des sols et des types sols, HEC-HMS subdivise le bassin versant et détermine le ruissellement, le volume d'eau écoulé et le débit de pointe de chaque sous-bassin.

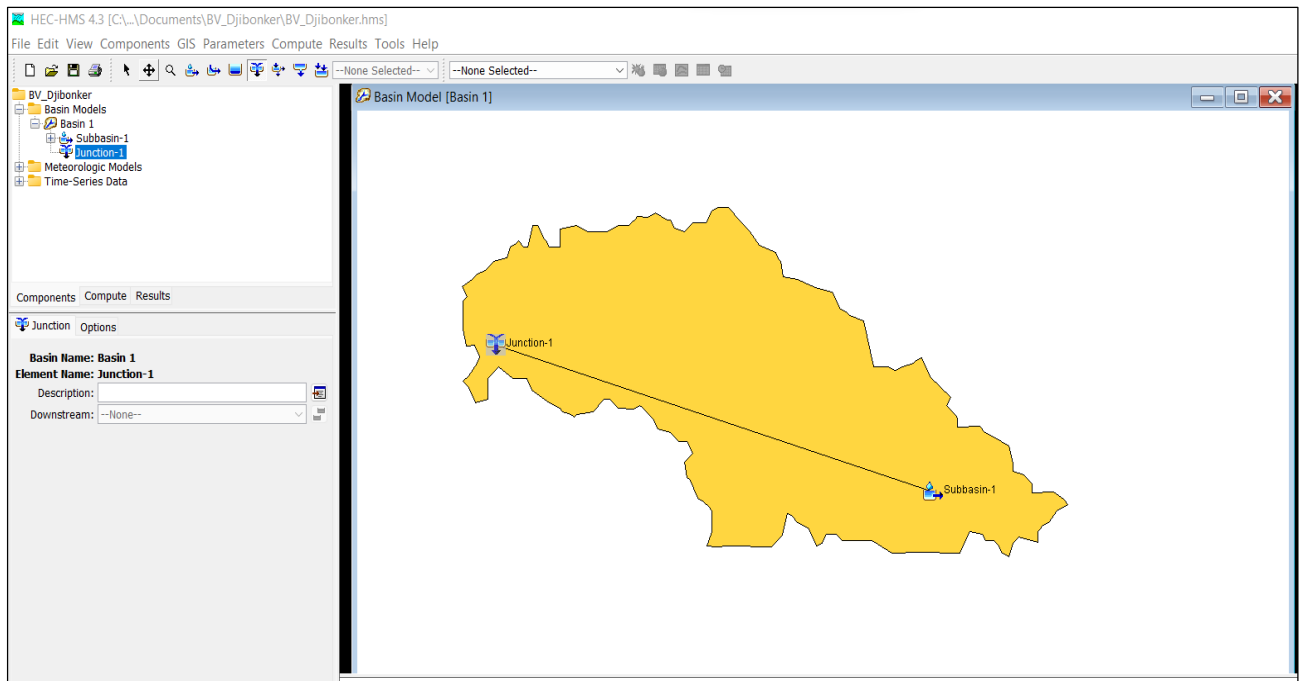


Figure 27: Interface du modèle HEC-HMS

V.2.1. La démarche pour la délimitation des sous-bassins

A partir du modèle numérique de terrain, les opérations de traitement de l'image sont effectuées pour ressortir les lignes de drainage, l'aire d'influence du drainage (km), le point de déversoir des eaux (l'exutoire), la délimitation des sous-bassins. Les différentes étapes du processus sont décrites dans le tableau 27.

Tableau 27 : Synthèse des étapes de répartition du bassin en sous-bassin sous HEC-HMS

Etapes (outils)	Description
Preprocess Sinks	Ressortir les lignes de drainage
Identity Stream	Génère l'aire d'influence
Break point manager	Point de convergence des eaux
Delineate elements	Délimitation des sous-bassins

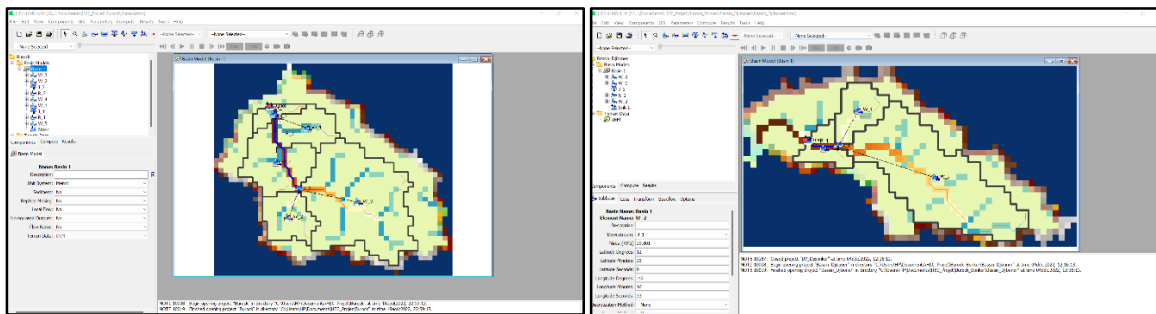


Figure 28 : Délimitation des sous-bassins dans l'arborescence HEC-HMS

V.2.2. Fonctionnement du modèle

Nous avons préféré travailler sur un intervalle de temps plus grand, à savoir à l'échelle mensuelle et annuelle. Ainsi, pour bâtir un modèle pluie-débit, on a besoin de plusieurs fonctions. Il s'agit de la fonction de production, de transfert, de récession, et de routage (fig.29).

- ✓ La fonction de production est liée aux propriétés du sol. Elle met l'accent beaucoup plus sur les pertes (infiltration).
- ✓ La fonction de transfert va permettre à la pluie de se transférer en débit c'est-à-dire passer du hyétogramme à l'hydrogramme.
- ✓ La fonction de récession met l'accent sur la façon d'amortissement de l'hydrogramme dans le temps.
- ✓ La fonction de routage assure le transfert ou l'acheminement des eaux de la vallée vers le versant.

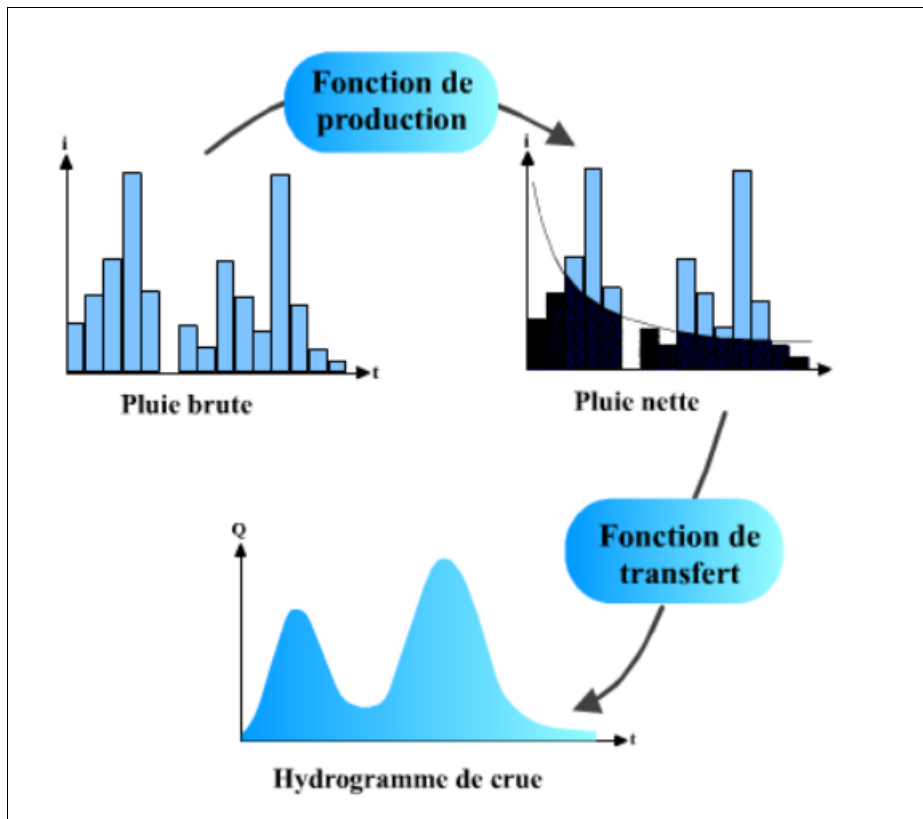


Figure 29 : Principe de fonctionnement du modèle (Musy, 2005)

Le principe de fonctionnement du modèle HEC repose sur les paramètres d'entrée (observées) et de sortie (calage). Pour mieux comprendre ce principe de fonctionnement, il faut mettre en place des critères de routage du modèle. Les caractéristiques du modèle ne prennent en compte que les aspects liés à la topographie. La modélisation hydrologique demande une mise à niveau des eaux dans le bassin versant et prend en compte plusieurs aspects et paramètres. La plupart des approches de gestion de l'eau dans les bassins versants intègrent beaucoup d'éléments pour la gestion de l'eau. Pour mieux caler cette étape, les hydrologues mobilisent plus de données en vue de comprendre les étapes essentielles de l'écoulement et/ou de ruissellement dans les bassins hydrographiques. Dans le modèle HEC-HMS, le module de production SCS Curve Number Loss permet d'appliquer plusieurs paramètres pour déterminer le ruissellement. Cette méthode relie les pertes en pluie à l'occupation des sols et le type de sol. La méthode nécessite trois paramètres : la perte initiale, le numéro de courbe et le pourcentage de surface imperméable.

V.2.3. Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS

L'application du modèle HEC-HMS nécessite une banque de données concernant le bassin ou les sites étudiés, afin qu'on puisse appliquer le modèle (Abdessalem, 2021). Parmi les données, on peut citer dans le cas de cette étude :

- les caractéristiques morphométriques des bassins :
 - ✓ les surfaces des sous-bassins versants ;
 - ✓ le type de sol ;
 - ✓ la pente.
- les précipitations ;
- les données d'occupations des sols.

Ces paramètres d'entrée permettent de faire fonctionner notre modèle pluie-débit sur les pas de temps au choix.

Tableau 28 : Données de base du sous-bassin versant d'Agnak (2004)

N°	Sous-bassin	Surface (Km ²)	Pente (m/m)	Lag. time (mn)	CN
1	Sbv_1	10,681	0,013	135,94	86,34
2	Sbv_2	11,699	0,017	142,37	76,01
3	Sbv_3	52,135	0,012	323,03	76,78
4	Sbv_4	18,820	0,015	209,91	76,57
5	Sbv_5	3,942	0,012	93,83	84,08

Les données du Curve number (CN) sont comprises entre 30 et 100 pour les sols perméables.

V.2.4. Détermination des paramètres du curve number et des fichiers de simulation

La valeur du *curve number* (CN) varie entre 30 et 100 (surface d'eau) pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration (Abdessalem, 2021). Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation des sols et de type de sols, un CN composite doit être calculé sur la base de la formule suivante :

$$CN \text{ composite} = \frac{\sum A_i C N_i}{\sum A_i}$$

CN composite : le CN utilisé pour l'ensemble du bassin versant par la fonction de production ;

CN_i : le CN d'un composé hydrologique du sol (classe d'occupation des sols + classe de sol) ;

Ai : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

V.2.4.1. Occupation des sols

Le travail sur l'occupation des sols a été effectué sur deux périodes 2004 et 2020. Dans l'ensemble, 9 unités paysagères ont été identifiées sur chaque carte des bassins d'étude. Les données d'occupation des sols sont comprises entre 5 et 10 pour une période de 10 ans. Pour chaque sous-bassin, les valeurs de *curve number* (CN) sont déterminées de même que les surfaces qu'elles occupent respectivement en 2004 et 2020.

V.2.4.2. Détermination des groupes hydrologiques des sols

Sur l'étendue des territoires des bassins, se répartissent différents types de sols classés en groupes hydrologiques. Le groupe A contient des sols sableux dont la capacité d'infiltration est élevée et le degré de ruissellement faible (0,30-0,45 mm/h). Ces types de sols ne sont pas identifiés dans l'ensemble des deux bassins.

Le groupe hydrologique B est composé de sols sablo-argileux. Il constitue le groupe de sol à faible potentialité de ruissellement compris en 0,15-0,30. Ils sont localisés au niveau des plateaux (zone de cultures). En général, ce sont des sols de type ferrallitique. Ces sols occupent des espaces importants sur l'ensemble des territoires des bassins de Djibonker et d'Agnak.

Le groupe hydrologique C est composé aussi de sols sableux-argileux avec une prédominance des sables. De type ferrallitique, ce groupe a un potentiel de ruissellement relativement important (0,05-0,15). On localise ce groupe hydrologique au niveau des pentes.

Le groupe hydrologique D est composé de sols de type hydromorphe qui ont des capacités de ruissellement élevé (0-0,05) localisés au niveau des bas-fonds. Généralement, on y retrouve des sols hydromorphes avec des compartiments constitués de sel.

Tableau 29 : caractéristiques des groupes de sols

Groupe hydrologique	Groupe de sol	Potentiel de ruissellement en (mm/h)	Localisation	Types de sol
A	Sableux	Très faible (0,30-0,45)	Plateaux	Sols ferrallitiques
B	Sablo-argileux	Faible (0,15-0,30)	Plateaux	Sols ferrallitiques

C	Sablo argileux à argilo-sableux	Moyen (0,05-0,15)	Pentes	Sols ferrugineux
D	Argileux	Maximal (0-0,05)	Bas-fonds	Sols hydromorphes

Source : McCuen (2004) ; Caluer *et al.* (2011) ; Bernabe (2019)

V.2.4.3. Le Curve-Number (CN) tributaire des conditions d'humidité

La valeur du *Curve-Number* (CN) est conditionnée par les conditions d'humidité. A une période humide, la valeur du *Curve-Number* est plus élevée qu'à la période relativement sèche. La valeur du CN est obtenue selon la situation sur la base des formules suivantes :

$$CN (I) = 4,2CN (II)/ 10-0,058CN(II) \dots \text{Condition sèche}$$

$$CN (III)= 23CN(II)/10+0,13CN(II)\dots\dots \text{Condition humide}$$

Les conditions d'humidité et de sécheresse sont inhérentes au mode de fonctionnement hydrologique des rivières. Le ruissellement des eaux dans les compartiments du bassin versant dépend aussi de la nature du sol et du mode d'occupation des sols. Cette méthode facilite l'évaluation du volume d'eau ruisselé et la quantité d'eau stockée par les différents sous-bassins identifiés.

V.2.4.4. Détermination des fichiers de simulation

Avant la calibration, un prétraitement des paramètres de chaque bassin a été fait en vue de mieux refléter les réalités des bassins d'étude.

Le temps de concentration a été calculé en appliquant la formule suivante :

$$Tc = \frac{(L)^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{441Y^{0,5}}$$

Où :

Tc = temps de concentration (heure)

L = plus long chemin hydraulique

Y = Pente du bassin en pourcentage %

CN = SCS *Curve number section* (29-10)

Tableau 30 : Paramètres Curve-Number (CN) et variables calculées en 2004 à Agnak

Sous-bassin	CN	Bassin Slope m/m	Bassin Slope%	Tc (H)	Tc (mn)	Lagtime (tl)	S	Initial abstraction (la) mm
Sbv_3	76,78	0,01	1,29	8,9729441	538,376646	323,03	76,83	15,37
Sbv_2	76,01	0,02	1,77	3,95465777	237,279466	142,37	80,15	16,03
Sbv_4	76,57	0,02	1,57	5,83078517	349,84711	209,91	77,72	15,54
Sbv_1	86,34	0,01	1,31	3,77606905	226,564143	135,94	40,18	8,04
Sbv_5	84,08	0,01	1,25	2,60651665	156,390999	93,83	48,08	9,62

*CN : Curve Number ; Tc : Temps de concentration Heure et minute.

Les valeurs de CN des différents sous-bassins sont supérieures au volume d'eau stockée dans les sous-bassins. Le ruissellement semble être très élevé dans le bassin d'Agnak. Le sous-bassin 2 enregistre un volume d'eau infiltré assez important comparée au reste des sous-bassins. Le temps de concentration moyen est estimé à 4,5 heures, dont un temps de concentration de 8,9 heures enregistré dans le sous-bassin 3 (tableau 30).

Tableau 31 : Paramètres *Curve Number* (CN) et variables calculées en 2020 à Agnak

Sous-bassin	CN	Bassin Slope m/m	Bassin Slope%	Tc (H)	Tc (mn)	Lagtime (tl)	S	Initial abstraction (la) mm
Sbv_3	89,89	0,013	1,29	5,74	344,29	206,57	28,58	5,72
Sbv_2	89,59	0,018	1,77	2,50	150,16	90,09	29,50	5,90
Sbv_4	88,85	0,016	1,57	3,86	231,82	139,09	31,88	6,38
Sbv_1	89,65	0,013	1,31	3,33	199,61	119,77	29,32	5,86
Sbv_5	89,61	0,013	1,25	2,12	127,42	76,45	29,43	5,89

En 2020, sur la base de l'évolution des unités paysagères associées aux types de sol, les valeurs de SCS-CN et le temps de stockage de l'eau ont considérablement évolué sur chaque sous-bassin. On note des valeurs de CN comprises entre 88 et 90 (tableau 31). Ces valeurs reflètent la nature du ruissellement dans le bassin.

Tableau 32 : Paramètres *Curve-Number* (CN) et variables calculées en 2004 à Djibonker

Sous-bassin	CN	Bassin Slope m/m	Bassin Slope%	Tc (H)	Tc (mn)	Lagtime (tl)	S	Initial abstraction (la) mm
Sbv_3	74,00	0,01	1,24	12,96	777,73	466,64	89,24	17,85
Sbv_2	73,50	0,01	1,15	5,20	311,76	187,05	91,58	18,32
Sbv_4	75,00	0,01	1,22	4,29	257,10	154,26	84,67	16,93
Sbv_1	77,00	0,01	1,23	4,65	279,09	167,45	75,87	15,17
Sbv_5	79,07	0,01	1,12	2,75	164,80	98,88	67,23	13,45

Tableau 33 : Paramètres *Curve-Number* (CN) et variables calculées en 2020 à Djibonker

_Sous-bassin	CN	Bassin Slope m/m	Bassin Slope%	Tc (H)	Tc (mn)	Lagtime (tl)	S	Initial abstraction (Ia)mm
Sbv_3	78,0	0,01	1,24	11,53	692,07	415,24	71,64	14,33
Sbv_2	79,0	0,01	1,15	4,42	265,35	159,21	67,52	13,50
Sbv_4	83,0	0,01	1,22	3,35	200,98	120,59	52,02	10,40
Sbv_1	85,0	0,01	1,23	3,60	216,00	129,60	44,82	8,96
Sbv_5	87,0	0,01	1,12	2,11	126,32	75,79	37,95	7,59

Les valeurs de SCS-CN obtenues sont plus faibles dans le bassin de Djibonker et qu'à Agnak. Le temps de concentration moyen déterminé est de 4,6 heures, un peu plus élevé qu'à Agnak (tableau 33).

V.3. Les limites du modèle HEC-HMS

Travaillant avec des modèles réputés imparfaits, il est nécessaire de s'interroger sur la pertinence des modèles choisis par rapport à la question posée, et d'examiner les incertitudes qui pourraient entacher les conclusions que nous allons tirer des analyses. Plutôt que la description exhaustive des processus, une des approches de la modélisation utilisée en hydrologie consiste à extraire de la complexité des systèmes hydrologiques observés à l'échelle des bassins versants, des caractères stables permettant d'interpréter leurs comportements sous l'effet des précipitations (Sighomnou, 2004).

Le SCS-CN est très utile dans l'étude des bassins non-jaugés. Mais, il présente quelques limites qu'on doit consciemment prendre en compte en utilisant ce modèle. Elles sont au nombre de trois principalement :

- d'abord ce modèle est développé aux Etats-Unis dans les conditions environnementales de ce pays. Mais, il n'a jamais été adapté de façon à prendre en compte les nuances dans d'autres régions géographiques (Carluer *et al.*, 2011) ;
- ensuite, la gamme des états de surface est tellement variée qu'il est difficile de déterminer le SCS-CN de certaines unités d'occupation des sols ;
- enfin, les résultats sont tributaires des modèles de transfert et de pertes choisis pour réaliser la simulation (Diémé, 2019).

Des efforts sont encore à réaliser sur un certain nombre de points, notamment une meilleure maîtrise de la variabilité spatio-temporelle des précipitations et de l'ETP, ainsi que du mécanisme de ruissellement sur les bassins. On pouvait penser, bien évidemment, à

des observations plus rigoureuses à l'échelle des bassins versants pour une connaissance plus pointue et pratique du ruissellement.

V.4. Détermination du ruissellement et de la crue dans les bassins versants

Les données de pluies des postes pluviométriques de Niaguis et Nyassia ont été utilisées pour alimenter notre modèle pluie-débit. Le modèle de précipitation utilisée pour déterminer la crue est le « Frequency Storm ». La distribution de la pluviométrie a été considérée sur 24 h pour les deux bassins versants. La lame d'eau écoulée a été obtenue en appliquant la formule suivante :

$$Le = \frac{Ve}{S}$$

Avec :

Ve : Volume d'eau ruisselé (m³).

S : Superficie du bassin versant (km²).

Le coefficient de ruissellement est estimé également en appliquant la relation mathématique suivante :

$$Cr = \frac{\text{Lame ruisselée (mm)}}{\text{Lame précipitée (mm)}}$$

V.4.1. Estimation du ruissellement dans le bassin d'Agnak

Pour chaque sous bassin obtenu, l'heure d'enregistrement de la crue et la lame d'eau écoulée semblent être différentes.

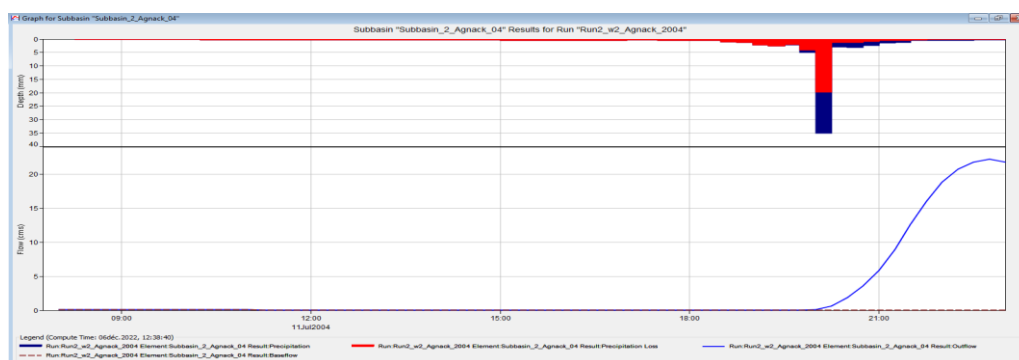
Pour les résultats de simulation obtenus, dans les sous-bassins d'Agnak, pour une précipitation de 36,06 mm enregistrée, des débits différents et très significatifs sont générés.

En 2004, le débit de pointe estimé à l'exutoire du bassin d'Agnak est de 120,6m³/s (tableau 34). La phase de montée se situe entre 21h et 22h 30mn sur l'ensemble des sous-bassins correspondant au débit maximal (fig.30). Le sous-bassin 1 a enregistré un débit de pointe de 34,9m³/s soit un apport de 28,93% du débit à l'exutoire du bassin. Les contributions des sous-bassins 2-3-4 et 5 sont respectivement de 22,2m³/s ; 24,5m³/s ; 23,4m³/s et de 15,6 m³/s à l'exutoire du bassin d'Agnak.

En 2020, le débit a considérablement augmenté à l'exutoire du bassin. On enregistre un débit de 388,4 m³/s pour une averse enregistrée le 05 juillet au courant de la même année. L'heure de la crue enregistrée est de 21h 30mn. Le débit de pointe du sous-bassin 3 est de 130,1 m³/s soit une contribution de 33,52 % sur le débit de pointe à l'exutoire du bassin d'Agnak, considéré comme l'apport le plus élevé. Il s'ensuit la contribution du sous-bassin 2 qui est 123,6 m³/s soit 31,87 du débit de pointe total. Les apports des bassins 1, 4 et 5 sont respectivement de 44,4 m³/s ; 67 m³/s et 23 m³/s (tableau 34). Pour le volume d'eau ruisselé, il est observé une augmentation considérable sur l'ensemble des sous-bassins. Selon les résultats de simulation obtenus, il est estimé à 659,2 m³ en 2004 et 2130,9 m³ en 2020. Le volume d'eau ruisselé dans le bassin 1 est passé de 228,0 m³ en 2004 à 318,4 m³ en 2020 soit une hausse de 90,4 m³ (tableau 34).

Tableau 34 : Ruissellement estimé dans le bassin d'Agnak en 2004 et 2020

Sous-bassins	Surface (km ²)	Débit de pointe (m ³ /s)		Volume ruisselé en m ³		Lame écoulee mm		Coef. Ruissellement %	
		2004	2020	2004	2020	2004	2020	2004	2020
SBV_1	10,68	34,9	44,4	228,0	318,4	6,8	21,9	18,75	60,74
SBV_2	11,70	22,2	123,8	129,2	554,0				
SBV_3	52,14	24,5	130,2	92,0	651,7				
SBV_4	18,82	23,4	67,0	100,0	445,3				
SBV_5	3,94	15,6	23,0	110,1	161,5				
Exutoire	97,28	120,6	388,4	659,2	2130,9				



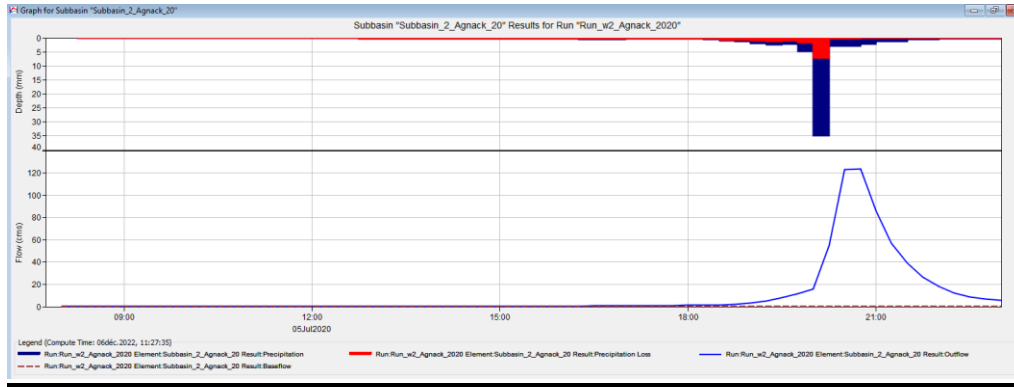


Figure 30 : Hydrogramme de crue de l'événement du 11 juillet 2004 et 5 juillet 2020 à Agnak

V.4.2. Estimation du ruissellement dans le bassin le bassin de Djibonker

Pour une précipitation estimée à 36,06 mm au poste de Nyassia, différentes crues ont été déterminées en 2004 et 2020.

En 2004, sur la base des résultats de simulation, un débit de pointe de 48,6m³/s a été enregistré à l'exutoire du bassin. Ce débit de pointe a été observé 2h 30 mn de temps après l'écoulement. La période de montée de la crue est située entre 20 et 22h 30 mn (fig.31). On constate que l'apport du sous-bassin 5 est de 16,9 m³/s soit une contribution de 34,77 % au débit de pointe total (tableau 34). Le second apport le plus important est celui du bassin 1 qui est 12 m³/s soit une contribution de 24,69 % au débit de pointe à l'exutoire du bassin de Djibonker en 2004.

En 2020, le débit de pointe est estimé à 231,9 m³/s à l'exutoire du bassin versant. Des disparités sont observées également dans l'apport spécifique de chaque sous-bassin au débit de pointe. La contribution des bassins 4 et 5 sont respectivement de 47,6 et 117,1 m³/s soit l'apport le plus élevé sur le débit de pointe du bassin versant.

Comme dans le bassin d'Agnak, le ruissellement a considérablement augmenté de 2004 à 2020 dans le bassin de Djibonker. Pour la première année, il est estimé globalement à 125,3 m³ et 553,6 m³ en 2020 à l'exutoire du bassin de Djibonker (tableau 35). L'évolution du ruissellement est plus caractéristique dans le sous-bassin 5 où le ruissellement passe de 30,5 m³ à 211,5 m³. Cette hausse du volume est due en partie aux mutations des états de surfaces observées entre 2004 et 2020 dans le bassin versant.

Globalement au niveau des sous-bassins versants étudiés, le temps de montée des eaux est compris entre 2h et 3h. Cette réaction du bassin semble être une situation normale car dans ce cas de figure, le taux d'infiltration des eaux semble très significatif.

Tableau 35 : Ruissellement estimé dans le bassin de Djibonker en 2004 et 2020

Sous-bassins	Surface (km ²)	Débit de pointe (m ³ /s)		Volume ruisselé en m ³		Lame écoulée mm		Coef. Ruissellement %	
		2004	2020	2004	2020	2004	2020	2004	2020
SBV_1	7,50	12,0	22,5	59,6	146,2	1,9	8,6	3,47	15,35
SBV_2	4,96	5,6	25,0	9,4	49,1				
SBV_3	39,80	5,1	19,7	9,0	34,8				
SBV_4	5,85	9,0	47,6	16,8	112,0				
SBV_5	6,23	16,9	117,1	30,5	211,5				
Exutoire	64,34	48,6	231,9	125,3	553,6				

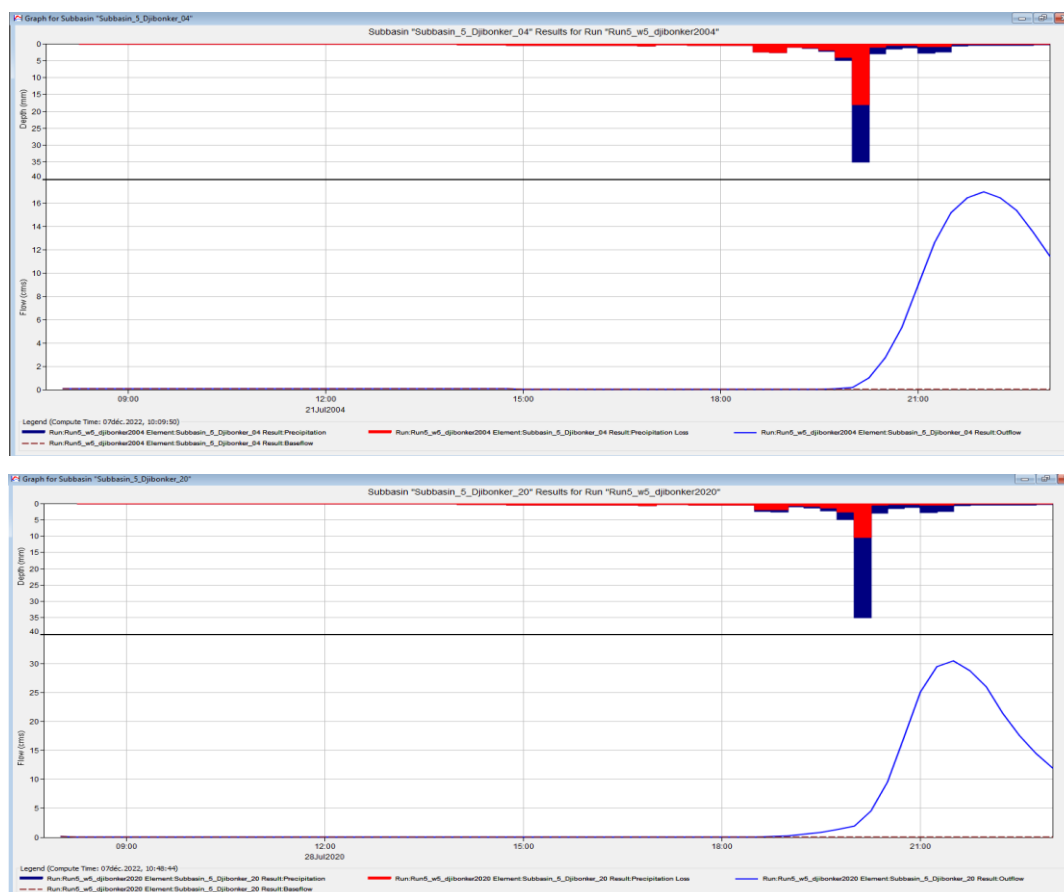


Figure 31: Hydrogramme de crue de l'événement du 21 juillet 2004 et 28 juillet 2020 à Djibonker

Conclusion du Chapitre V

La détermination du ruissellement dans les bassins-versants non jaugés semble difficile en l'absence de données d'observation régulières. Celle-ci a été déterminée dans cette étude par le modèle de simulation HEC-HMS dans les bassins-versants de Djibonker et d'Agnak. Il est observé des réactions hydrologiques différentes sur les deux sites. Aux échelles temporelles étudiées, deux événements de crues ont été obtenus dans chaque bassin-versant. Une crue, à la date du 21 juillet 2004 entre 21h et 22h30mn et une seconde crue à la date du 28 juillet 2020 à 21h30mn dans le bassin versant de Djibonker. Les deux autres crues ont été enregistrées aux dates du 11 juillet 2004 à 20h30mn et 05 juillet 2020 à 21h30mn à Agnak.

Ces événements ont généré des débits estimés à 120,3 m³/s en 2004 et 388,4 m³/s dans le bassin-versant d'Agnak. Le coefficient de ruissellement, passe de 6,8 à 21,9 de 2004 à 2020. Par contre, pour le bassin de Djibonker, le débit passe de 48,6 à 231,9 m³/s. En même temps, le coefficient d'écoulement a considérablement évolué en passant de 3,47 à 15,35 en 2004 et 2020.

On a montré dans cette étude que l'évolution du ruissellement dans les compartiments des bassins-versants est en phase avec les dynamiques de l'occupation des sols. En ce sens, la simulation hydrologique peut être un outil de prévision et de gestion efficace pour combler les lacunes de données hydrométriques dans les bassins-versants non jaugés. Également, le suivi et la quantification des sédiments drainés par les différentes formes d'écoulement est important dans la connaissance du comportement hydrologique des petits bassins versants ruraux.

CHAPITRES VI : EVALUATION DES FLUX SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DES MARIGOTS : QUANTIFICATION, DISTRIBUTION ET REPRESENTATION

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de taille micronique, maintenus en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement (Bouanani, 2005). Les matières en suspension (MES) désignent l'ensemble des matières insolubles présentes dans un échantillon liquide. Elles peuvent être constituées de matières minérales (argiles, limons, sables) mais aussi organiques. Le sable, qui constitue une partie des MES, est un matériau minéral, granulaire, issu principalement de l'érosion du bassin (Dramais *et al.*, 2018).

L'étude des transferts sédimentaires dans les bassins versants est une des thématiques de recherche les plus développées en vue d'améliorer la compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes et de proposer des modalités de gestion adaptées aux ressources locales (Viel, 2012). De par les pratiques agricoles multiples, les pressions sur la ressource sol deviennent de plus en plus énormes. En ce sens, l'utilisation de méthodes de collecte, de suivi et de prévision des flux sédimentaires semblent nécessaires. La surveillance du transport de sédiments nécessite une bonne technique d'échantillonnage, qui est très longue et coûteuse.

Aujourd'hui, les techniques basées sur la télédétection permettent de connaître les caractéristiques des particules de sols transportées par érosion hydrique. En effet, les particules en suspension absorbent et diffusent la lumière affectant la réponse spectrale des eaux de surface, en particulier dans le visible et le proche infrarouge (PIR), qui varient selon la concentration, la composition minéralogique, la teneur organique et la distribution de taille des particules (Reynolds *et al.*, 2010). Bien que l'usage de la télédétection en Afrique Sub-saharienne soit confrontée à des spécificités comme le fort contenu en aérosols, des valeurs très élevées de turbidité et de MES, des études récentes ont montré que ces données satellitaires sont efficaces pour suivre la variabilité de la turbidité et des MES des eaux continentales dans ces régions (Faye *et al.*, 2020). Kaba *et al.* (2014) ont étudié la dynamique temporelle d'un lac éthiopien à l'aide d'images Landsat. Robert *et al.* (2016, 2017) ont utilisé les données MODIS et Landsat pour documenter les MES et la turbidité dans le réservoir de Bagré au Burkina Faso, et dans la région de Liptako Gourma au Mali (Robert *et al.*, 2017). Au Sénégal, la méthode semble peu connue par les chercheurs à part les travaux de Mbaye *et al.* (2016) et Faye *et al.* (2020) sur le fleuve Sénégal. Trois processus définissent

le système fluvial d'après Shumm (1977) : il s'agit de la production des matériaux détritiques, le transfert et de l'accumulation des matériaux sapés (fig.32).

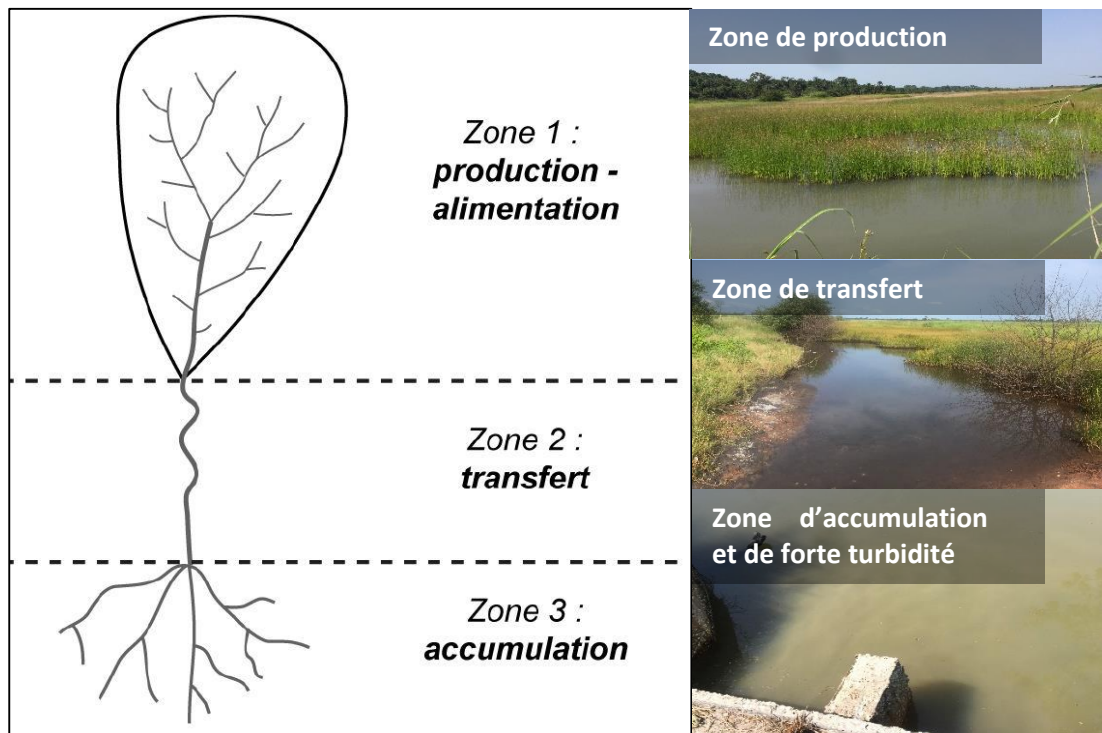


Figure 32 : Le système fluvial d'après Schumm, 1977

Dans les conditions naturelles, les rivières tendent à établir une combinaison « dynamique stable » entre deux types de variables :

- ✓ Les variables de « contrôle », c'est-à-dire celles qui s'imposent à la rivière et contrôlent son évolution physique ;
- ✓ Les variables de « réponse », qui permettent à la rivière de s'ajuster aux mutations des variables de contrôle (Malavoi et *al.*, 2011).

Le processus est conditionné par deux variables de contrôle fondamentalement importantes dans la dynamique fluviale : le débit liquide et le débit solide. Ces variables dictent le processus de mobilisation des particules des versants au fond de la rivière. Une fois les sédiments érodés puis mobilisés sur les versants, ces derniers transitent dans le système. Ils peuvent alors en être exportés ou stockés sur une période plus ou moins longue directement sur les versants ou dans la zone de transfert du système fluvial (Viel, 2012). Arrivés au pied du versant, les matériaux s'accumulent dans les plaines alluviales où ils sont pris en charge par les cours d'eau. De là, ils sont transportés par relais successifs et selon des temps souvent longs, par des dynamiques variées jusqu'à l'Océan où ils sédimentent (Valadas, 2011).

Ces différents dépôts peuvent être considérés comme des sources ou des sites d'accumulation en cas de modification du système fluvial. Il peut arriver que certaines mutations favorisent un transfert important de sédiments vers l'exutoire du bassin versant. La morphologie d'un cours d'eau, ou pour simplifier son style fluvial, peut donc varier dans l'espace mais aussi dans le temps en fonction des modifications du débit liquide (Q) et solide (Qs) (Malavoi *et al.*, 2011). Parallèlement aux études menées sur les dynamiques des transferts sédimentaires dans les cours d'eau, très nombreuses études se sont orientées au cours des dernières décennies sur la quantification des flux sédimentaires aux exutoires des bassins versants Boiloin *et al.*, 2008 ; Berni, 2012 ; Viel, 2012 ; Legoût, 2015 ; Quibeuf, 2019. En Afrique, on en déduit cinq études majeures ayant été réalisées sur des bassins versants relativement accidentés (Terfous *et al.*, 2001 ; Megnounif *et al.*, 2003 ; Gharbi, 2016 ; Bouguera *et al.*, 2019 ; Guesri, 2021).

L'objectif de ce chapitre est de comprendre la dynamique des matières en suspension à travers les méthodes de quantification sur l'exutoire des marigots. Il faut préciser que dans cette étude, les sédiments étudiés correspondent uniquement à la charge en suspension transportée par les cours d'eau et non la charge dissoute ; les outils à notre disposition n'étaient pas en mesure de quantifier ou estimer ce type de sédiments.

VI.2. Présentation des sites de prélèvement

Les échantillons de matières en suspension sont prélevés dans les cours d'eau, dans les sections de jaugeage, mais nécessairement aux verticales de mesures de vitesse (OMM, 2008).

A proximité des exutoires des bassins de Djibonker et d'Agnak, nous avons installé des repères pour faciliter la collecte *in situ* des échantillons d'eau. Comme décrit en haut, le processus de mobilisation des particules démarre au niveau des versants et se termine dans le seuil (barrage, digue, etc.) ou à l'exutoire des bassins versants. Nous rappelons qu'il existe plusieurs méthodes et moyens de collectes et quantification de sédiments dans les cours d'eau. Pour cette étude, l'approche qui semble répondre à nos objectifs et aux outils de collectes disponibles est la collecte aux abords des exutoires des bassins versants (fig.33).

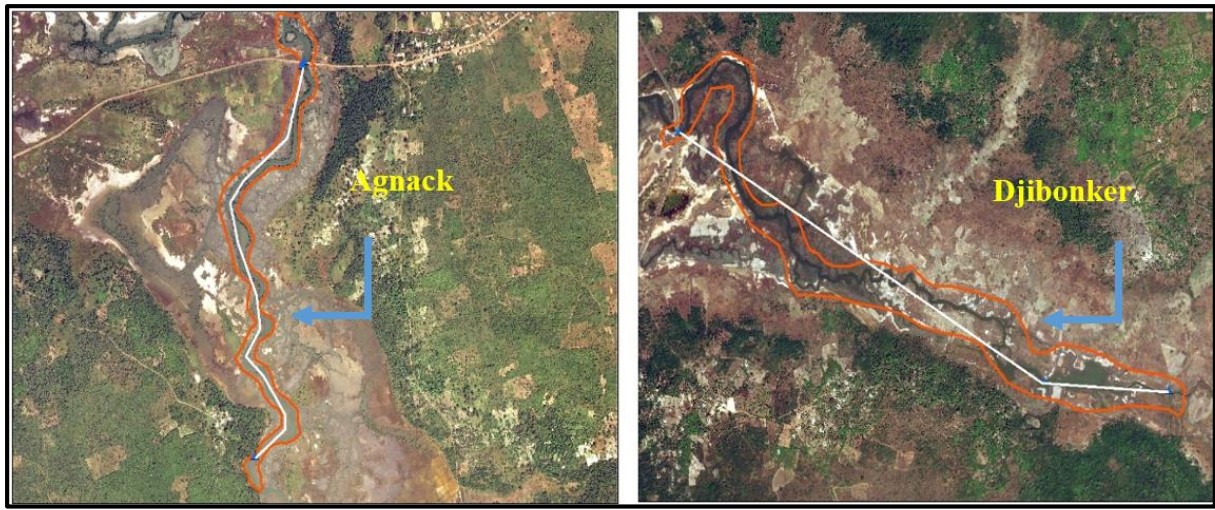


Figure 33 : Situation des sites de prélèvements des sédiments dans les bassins versants étudiés

VI.2. Données et méthodes

Pour l'étude de suivi des matières en suspension, nous avons réalisé des campagnes de prélèvement d'eau des marigots, des séchages et pesages de filtres échantillonnés au laboratoire et des calculs de la concentration de sédiments par une méthode de relation mathématique simple. Des échantillons d'eau ont été prélevés pour déterminer le diamètre de particules en suspension au niveau de chaque site.

VI.2.1. Données

Les données de hauteurs d'eau de 2021 ont été utilisées pour montrer la corrélation entre la distribution des sédiments et l'apport pluviométrique. Les données de hauteurs ont été collectées à la station limnimétrique de Djibonker. La procédure de collecte des données de matières en suspension repose sur un protocole établi en quatre étapes : le prélèvement des échantillons, le filtrage, le séchage à l'étuve et la détermination de la quantité de matières concentrées.

La détermination de la quantité de sédiments dans l'eau par télédétection est basée sur la réflectance dans les parties du visible et de l'infrarouge du spectre (OMM, 1972). En général la réflexion est une forme non linéaire de la concentration en matières en suspension, avec une réflectance maximale dépendant de la longueur d'onde et de la concentration des matières en suspension.

Les données de réflectance du Satellite LandSat Oli-Tirs disponible depuis 2013 ont été utilisées. Elles sont obtenues à partir du site Google Earth Engine, avec toutes les corrections atmosphériques disponibles. Le satellite LandSat 8 possède plusieurs bandes spectrales dans

le visible, le proche infrarouge et le moyen infrarouge, avec une résolution spatiale de 30 m et il acquiert les données avec une répétitivité temporelle de 16 jours. Pour ce travail, nous avons utilisé les bandes bleue, verte et rouge (respectivement les bandes 2, 3 et 4 à 482 nm, 561,5 nm et 654,5 nm), la bande proche infrarouge (la bande 5 à 865 nm) et les bandes du SWIR c'est-à-dire les bandes 6 et 7 à 1613,5 nm et 2202 nm (Faye *et al.*, 2020). La nécessité de collecter des données sur le terrain pour étalonner la relation matières en suspension et réflectance impose une limite à cette technique.

VI.2.2. Méthodes d'estimations de MES

Un calendrier de prélèvement a été proposé pour suivre la dynamique spatiale des matières en suspension des marigots. Étant une nouvelle expérience, nous avons procédé par l'identification des sites de prélèvements pour les deux marigots, l'identification des outils de prélèvements et des outils de collecte comme une bouteille d'eau minérale (échantillon d'eau), un GPS portable (coordonnées des sites), un centimètre (niveau de profondeur de l'eau échantillonnée). La mission de collecte de données a démarré au mois de décembre 2020 et a pris fin au mois de novembre 2021. Dans cette optique, l'équipe a procédé à deux méthodes de quantification et de caractérisation des matières en suspension étalées au pas de temps mensuel.

VI.2.2.1. Prélèvements des échantillons d'eau

Les mouvements de transports et dépôts de sédiments des cours d'eau font partie intégrante du fonctionnement hydrologique. La quantification des sédiments en suspension permet de mieux comprendre le processus de transport solide pour améliorer la gestion et le transit des sédiments vers l'aval (Damas *et al.*, 2022). Ainsi, les chercheurs (Duinker *et al.*, 1979 ; Phillips *et al.*, 2002 ; Le-Bescond *et al.*, 2018) ont développé des entrées différentes pour mieux quantifier et caractériser ces matériaux détritiques des cours d'eau. A cet effet, des méthodes et approches sont développées de par des techniques *in situ* mises en place par les chercheurs.

Plusieurs méthodes d'échantillonnage sont utilisées pour collecter les MES :

- un échantillonnage d'eau manuel ou via l'utilisation de préleveurs automatiques, suivi d'une infiltration (Duinker *et al.*, 1979 ; Mahler et Van Metre, 2003) ou une décantation dans le cas de fortes concentrations en MES-typiquement supérieur à 0,5-1g/l (Etcheber et Jouanneau, 1980) ;

- un pompage suivi d'une centrifugation par continu (CFI, Burrus *et al.*, 1989 ; Schäfer and Blanc, 2002 ; Le-Bescond *et al.*, 2018) ;
- l'utilisation de pièges à particules (Phillips *et al.*, 2000 ; Pohlert *et al.*, 2011 ; Le-Bescond *et al.*, 2018 ; Masson *et al.*, 2018 ; Dabrin, 2019).

Toutefois, ces méthodes d'échantillonnage ont des limites. Par exemple, les échantillonneurs standards dans certains pays ayant une contenance d'un litre ou moins, l'échantillonnage devra être répété jusqu'à ce que l'on obtienne le volume de prélèvement nécessaire. Également, les modes de prélèvements peuvent être les mêmes, mais la saison des mesures contribuerait à des résultats différents en fin de campagne. Dans le cadre de cette étude, nous avons veillé à définir deux sites spécifiques pour toute la période de suivi. Ils sont matérialisés par des repères.

Pour l'échantillonnage, on s'est muni d'une bouteille d'eau minérale et surtout bien rincée pour éviter d'associer cette eau avec de l'eau à échantillonner. La bouteille d'eau a été rincée 3 fois. Le marigot étant facile d'accès, nous avons effectué le prélèvement à l'intérieur afin de ne pas prendre les sédiments du rivage (dès fois, nous avons échantillonné à l'aide d'une pirogue), et surtout éviter d'échantillonner l'eau de surface. Pour mieux maximiser les éléments à mesurer, nous avons bien rempli la bouteille d'eau avant de la fermer hermétiquement. Les quantités d'eau prélevées sont comprises entre 0,5l et 1 litre (tableau 36) pour ne pas excéder le volume d'eau recommandé par l'OMM en 1994.

Tableau 36 : Quantité d'eau recommandée pour les prélèvements (OMM, 1994)

<i>Concentration attendue en matériaux, gm³</i>	<i>Volume du prélèvement en litres</i>
>100	1
50-100	2
20-30	5
<20	10



Photo 8 : Matériels utilisés pour le prélèvement

A chaque campagne de prélèvement, nous avons utilisé une bouteille d'eau minérale vide de 0,5 l différente de celle de la mission précédente (photo 8). Cette approche permet non seulement d'éviter les erreurs dans la collecte d'échantillons mais aussi de dissocier les matières prélevées en amont et celle de la mission précédente. Une pompe à membrane (photo 8) a été utilisée pour faciliter le filtrage de l'eau échantillonnée des marigots.

VI.2.2.2. Procédure avant le pesage des filtres

Des filtres en fibre de verre Whatman GF/ pré-pesés (porosité du filtre égale à 10 μm) avec une taille de pore de 0,7 μm ont été utilisés pour la détermination du taux de concentration de MES (Bouguerra et Bouanani, 2019 ; Mbaye *et al.*, 2016). Les filtres ont été pesés au laboratoire du GET sur une balance (photo 8) avant d'échantillonner les matières en suspension.

Le filtrage et le séchage des matières en suspension ont été effectués au laboratoire de Physique et Chimie des Matériaux (LCPM) de l'UASZ (12 mois). Étant donné que les filtres humides agissent sur le poids et risquent de biaiser le poids après pesage, nous les avons conditionnés après filtrage à une température de 45°C afin d'éviter qu'ils ne soient trop humides. Également, le séchage permet de ne pas altérer le filtre qui est très fragile.



Photo 9 : Balance de pesage des filtres et site de prélèvement de Binako (Djibonker)

VI.2.2.3. Procédure de collecte et pesage des filtres au GET

Les différentes étapes de la procédure sont les suivantes :

- agiter avant de filtrer, permet de remuer les matières en suspension en vue de ne pas les perdre ;
- filtrer avec le dispositif de filtration : cette étape permet de dissocier l'eau prélevée et les matières solides qu'elles contiennent ;
- mettre le filtre avec les sédiments dessus dans une barquette avec un support d'aluminium, le support d'aluminium aide au maintien des sédiments conditionnés ;
- mettre la barquette à sécher dans une étuve à 105°C (+_2°C) pendant deux heures. Cette phase est nécessaire pourvue de limiter une éventuelle perte de matière solide ;
- enfin, remettre le filtre dans sa boîte et numéroter. La numérotation facilite l'identification des filtres à la fin de la campagne de suivi. Les échantillons de matières en suspension sont en général traités et analysés dans les laboratoires spécialisés (OMM, 2020).

VI.2.2.4. Méthodes de calculs de la concentration de MES

La concentration en matières en suspension est la masse de matières sèches contenues dans une unité de mesure de volume du mélange eau-sédiment et s'exprime en mg⁻¹, gl⁻¹ ou en kgm⁻³ (OMM, 2020).

Les matières en suspension sont déterminées à partir de la différence entre le poids sec après filtrage et le poids sec avant filtrage divisé par le volume d'eau filtré :

$$\text{MES (g/l}^{-1}\text{)} = \frac{\text{poids après filtration} - \text{poids avant filtration}}{\text{Volume d'eau filtré}}$$

VI.3. Représentation des sédiments observés sur les deux sites

Les observations faites périodiquement sur le régime des matières en suspension des marigots indiquent une variation de concentration de sédiments sur toutes les séquences. Des modifications légères des quantités de matières concentrées sont enregistrées sur les sites de prélèvements durant chaque mois. Des débuts de campagne (04 décembre 2020 au 28 novembre 2021), pour chaque 150 ml d'eau échantillonnée, différentes valeurs de concentrations sont obtenues.

Au premier trimestre de notre planning de prélèvements, qui concerne les mois de décembre, janvier et février, les flux de sédiments sont moins importants. Les quantités de concentrations obtenues sont respectivement de 0,012 ; 0,029 ; 0,24 g/l⁻¹ à Binako (bassin de Djibonker) et 0,098 ; 0,22 et 0,25 g/l⁻¹ à Agnak (fig. 34).

Au second trimestre (mars-avril et mai), les concentrations de sédiments sont relativement élevées. Les quantités de sédiments sont 0,36 ; 0,73 ; et 0,01 g/l⁻¹ à Binako et 0,32 ; 0,41 ; 0,50 g/l⁻¹ à Agnak (fig.34). Une légère augmentation des sédiments est constatée durant ce trimestre. Les augmentations sont plus observées au mois d'avril à Binako et en mai sur le site d'Agnak.

Le troisième trimestre, les concentrations des sédiments évoluent de 1,04 ; 0,59 et 0,046 g/l⁻¹ à Binako. A Agnak, ces valeurs passent de 1,52 ; 0,33 à 0,022 g/l⁻¹ pour le compte des mois de juin, juillet et août (fig. 34). Au mois de mai et de juin, les premières pluies torrentielles arrachent les particules de sols et les drainent pendant l'écoulement. Ces premières pluies arrivent accompagnées de vents forts dans la partie méridionale de la Casamance.

Le dernier trimestre (septembre, octobre et novembre), les quantités de sédiments sont 0,61 ; 0,71, et 0,79 g/l⁻¹ à Binako et 0,022 ; 0,36 et 0,45 g/l⁻¹ à Agnak (fig. 34). Ces variations mensuelles de sédiments au niveau des différents sites sont fortement liées au débit d'eau des marigots. Pendant les trimestres où la réponse hydrologique est élevée, les sédiments en suspension véhiculés par le cours d'eau et ses affluents ont tendance à croître. La grande majorité des études menées sur les MES montre ainsi que les transferts réalisés en dehors des périodes de crues sont très faibles alors que les volumes et les concentrations augmentent avec l'accroissement du débit. Les matériaux en suspension sont abondants lorsque les débits sont forts, en période de crue, en particulier après de fortes pluies provoquant des apports directs depuis les sols cultivés ou mal protégés par la végétation (Valadas, 2011).

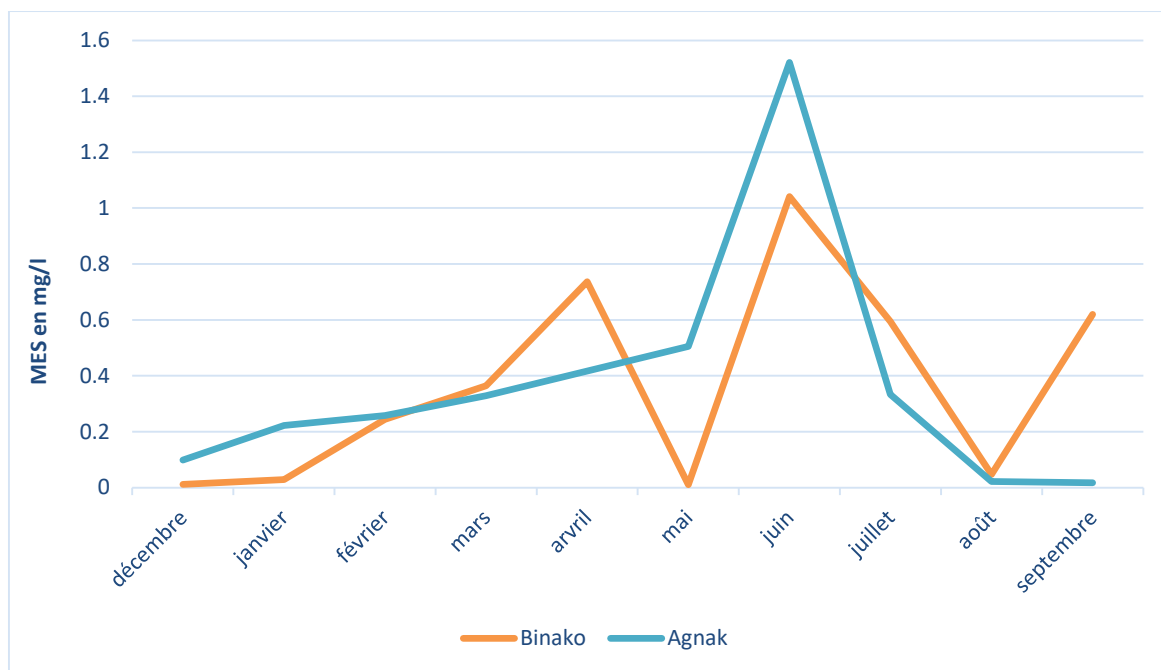


Figure 34 : Evolution mensuelle des matières en suspension (MES)

VI.4. Distributions saisonnières des matières en suspension (MES)

Les concentrations de matières en suspension ont été regroupées par saison en vue d'une meilleure appréciation de leur distribution au niveau des bassins d'étude. Les données traitées indiquent une légère variation de sédiments est observée en saison de pluies et en saison sèche.

En saison des pluies, dans le site de Binako, les taux de sédiments varient suivant le débit d'eau du marigot mais aussi de l'apport de la pluviométrie. Durant les mois de juin, juillet et août, il a été enregistré des apports solides importants de 2,30 g/l⁻¹ de MES, représentant 62,2 % de l'apport total observé. Sur le même site, en saison sèche, des variations de faible concentration de sédiments sont enregistrées au mois de décembre, janvier février et mai 1,39 g/l⁻¹ MES, soit 37,8 % de l'apport total (fig. 35).

Dans le bassin d'Agnak, les mêmes variations de sédiments sont enregistrées en saison de pluies et celle sèche. En saison des pluies, une quantité de sédiments de 1,89 g/l est obtenue soit un taux de concentration de 50,9 %. Les mois de juillet, août et septembre sont les mois où les poids les plus importants sont notés. Pendant la saison sèche, le flux de sédiments est réduit par la baisse du niveau d'eau. On a enregistré à cette saison des quantités relativement faibles, 1,82 g/l⁻¹ pour un taux estimé à 49,1 % (fig. 35).

Les variations du régime sédimentaire dépendent des conditions hydrométéorologiques. En période de fortes pluies, les sédiments sont plus concentrés sur les deux sites de suivi. De plus, ces flux engendrent en continuité une perte énorme de sédiments dénudant de ce fait le manteau des sols.

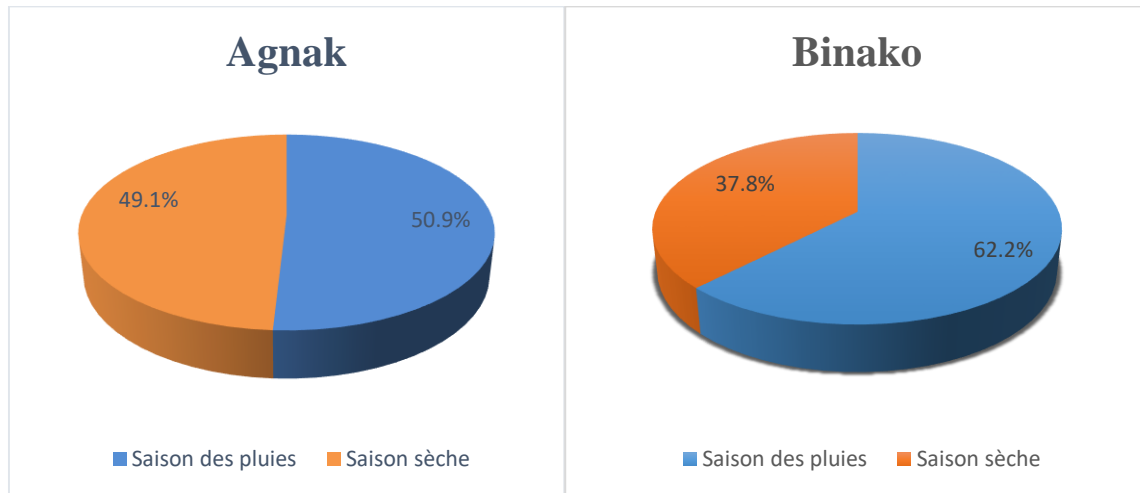


Figure 35 : Répartition saisonnière des apports solides (en %) dans les sites étudiés

Ainsi, à travers ces quantités de sédiments prélevées, nous avons estimé la dégradation spécifique (en t/km²/an) sur chaque bassin respectif par la méthode mathématique ci-dessous :

$$A_{ss} = A_s / S$$

Où : **S** est la surface du bassin versant ; **A_s** est l'apport solide annuel (t).

Après l'application de la formule, nous avons obtenu les résultats suivants :

- dégradation spécifique annuelle à Djibonker : 0,034t/km²/an ;
- dégradation spécifique annuelle à Agnak : 0,032t/km²/an.

Cette dégradation spécifique est extrêmement faible comparée à celle notée dans le nord sahel, bassin du Hodna, en Algérie, 230t/km²/an (Hasbaia et al., 2012). Cela semble être normal au vu des caractéristiques physiques du bassin de la Casamance, qui est presque couvert par la végétation.

VI.5. Relation hauteurs d'eau et matières en suspension (MES) *in situ*

La figure 36 indique une relation entre les MES et les hauteurs d'eau observées dans le marigot de Djibonker. Cette corrélation positive est de 0,35 (fig. 36). Les périodes de

concentrations élevées de MES correspondent en même temps aux épisodes de débits élevés du marigot. En juin, la valeur de concentration obtenue est élevée en relation également avec la hauteur d'eau observée. Parallèlement, les valeurs de concentration faibles de même que les hauteurs faibles sont enregistrées au courant des mois de décembre, janvier et mai.

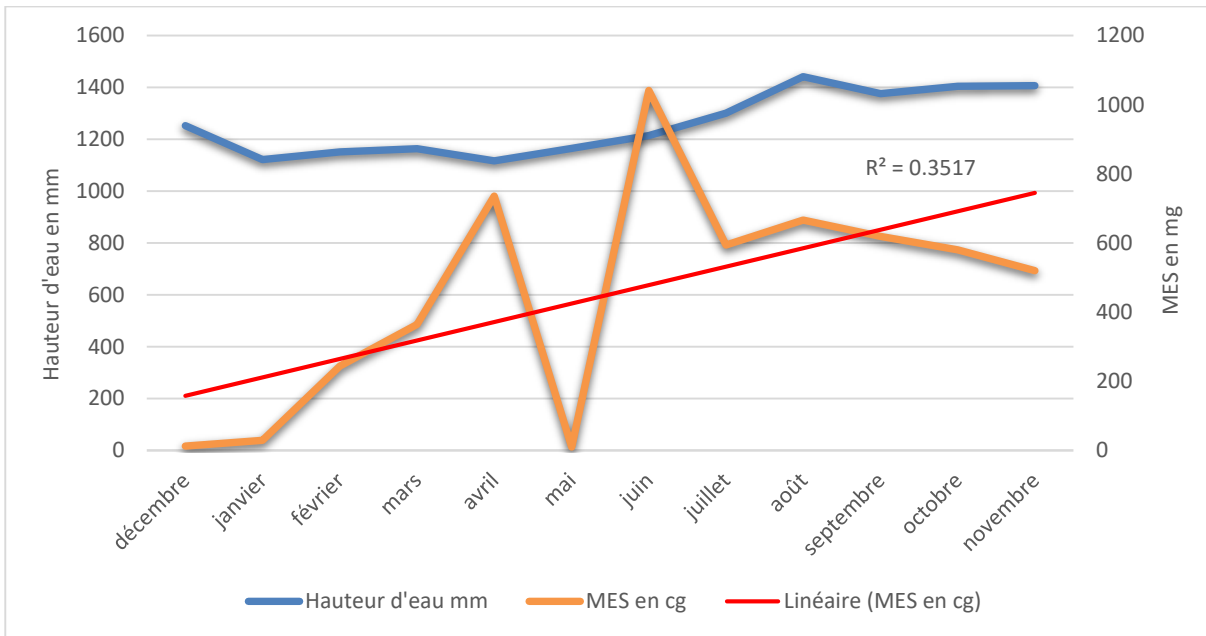


Figure 36 : Corrélation MES et hauteurs limnimétriques

VI.1. Relation entre réflectance satellite et MES

On observe une corrélation positive entre la réflectance des bandes du satellite Landsat 8 et les MES *in Situ*. Les corrélations sont plus fortes au mois de décembre, janvier et février. Cette relation montre la pertinence d'utiliser les outils de la télédétection pour le suivi des flux de sédiments dans les rivières. Les concentrations déduites de l'observation sont presque proches des données tirées de la réflectance satellitaire (fig.37).

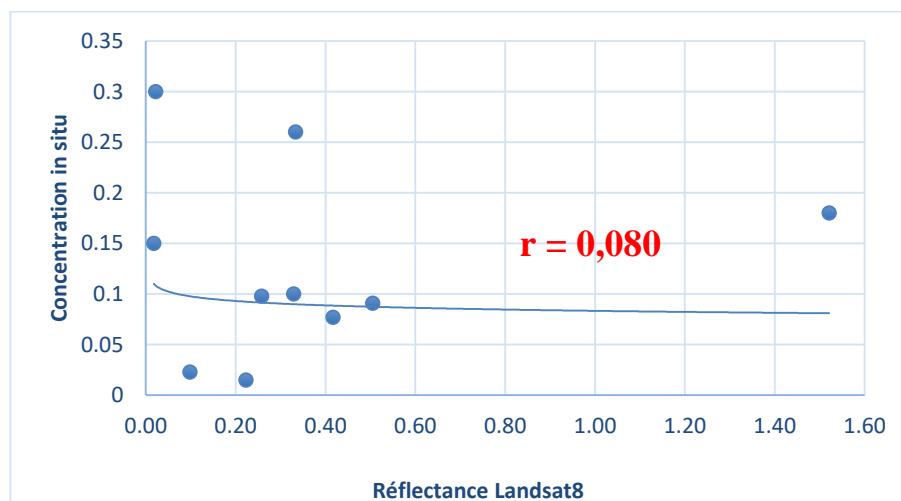


Figure 37 : Relation réflectance Landsat 8 et MES in situ dans le marigot d'Agnak

VI.1.1. Analyse granulométrique des sédiments en suspension

La méthode de la granulométrie à diffraction laser a été utilisée pour déterminer la distribution de la taille des particules en suspension dans les sites de mesure ou d'essai. La granulométrie par diffraction laser fonctionne sur la base de deux facteurs : la mesure d'une variation d'angle et d'une intensité de lumière. La technique consiste en la projection d'un faisceau laser sur une portion de particules éparses. En les traversant, une lumière se diffuse suivant un angle dont la variation dépend de la taille des particules. D'une façon générale, les particules de taille importante génèrent des angles inférieurs par rapport aux autres. On détermine les dimensions de ces éléments à partir des images de diffraction.

Les analyses ont été faites au laboratoire d'écologie fonctionnelle et environnement de Toulouse au sein de la Plateforme d'Analyse Physico-chimiques qui a pour vocation l'analyse de sédiments, de sol et de matrices biologiques issues de milieux naturels.

Tableau 37 : Récapitulatif des paramètres statistiques calculés

Variab les déterminées (μm)	Agnak	Binako
Diamètre médian	40,01750	53,63946
Diamètre moyen	38,90705	53,74160
Variance (μm^2)	260,68	547,97
Ecart-type (μm)	16,145	23,4088
Diamètre mode	47,6921	62,8017

La distribution des particules en suspension dans les différentes fractions granulométriques traduit une nette prédominance des particules de diamètre compris entre 20 et 60 μm . Les traitements statistiques avec les variables descriptives indiquent des diamètres moyens de 38,90 μm à Agnak et 53,74 μm à Binako (tableau 37). On observe beaucoup de variance de diamètre dans les données observées sur les deux sites. A partir des fréquences des écart-types, les tailles de particules supérieures ou égales à la moyenne sont plus importantes dans l'échantillon de Binako (23,4) et moins élevées dans l'échantillon mesuré à Agnak. Les raisons peuvent être déduites des pratiques agricoles très développées dans le bassin de Djibonker qui abrite le site de Binako.

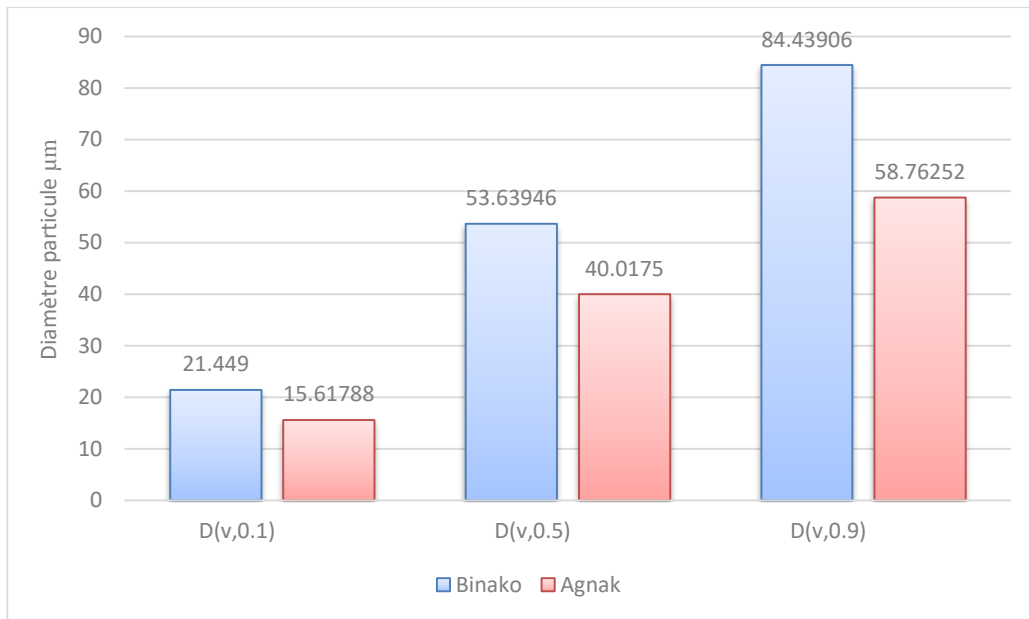


Figure 38 : Diamètres des particules de l'eau échantillonnée dans les sites étudiés

Parmi les échantillons prélevés sur les sites de Binako et d'Agnak, plusieurs particules ont été déterminées après analyse par diffraction laser. Il faut rappeler que le diamètre micron correspond au diamètre de la sphère de volume équivalent à la particule mesurée (en µm). Le q % correspond au pourcentage du volume des particules à la taille correspondante (sur le volume total des particules de l'échantillon). Le Passant (%) est considéré comme les pourcentages cumulés du volume des particules à la taille correspondante (sur le volume total des particules de l'échantillon).

Les résultats de l'analyse granulométrique indiquent une distribution inégale des particules en suspension. Les eaux échantillonnées sont associées à des particules de volume ou de diamètre différents compris entre 3,40 µm à 133,10 µm (fig.38).

Sur le site de d'Agnak, les diamètres de MES déterminés sont compris entre 4,47 à 88,58 µm. Les particules de volume de 51,471 sont les plus dénombrées dans l'échantillon (15,61 %).

Sur le site de Binako, les diamètres observés sont compris entre 3,409 à 133,10µm (fig.38). Le pourcentage du volume de particules le plus échantillonné est de 12,991 % soit un diamètre déterminé de 67,52 µm. Pour le constat, les sédiments observés dans les échantillons prélevés sont de tailles pratiquement hétérogènes. Cela semble plus normal car l'intensité de l'eau et de l'érosion de la couche superficielle de l'eau varie en fonction des saisons ou épisodes de crues ou d'étiage.

On a tendance à dire que les argiles et les matières organiques jouent un rôle de ciment et réduit le sapement des particules en suspension dans l'eau. Toutefois, lorsque l'érosion a commencé, la cohésion des sédiments paraît brusquement rompue et la mise en suspension peut être très rapide (Smith, 1975). Dans les deux marigots, la vitesse des processus d'érosion et de sédimentation n'est pas connue pour permettre de mieux développer la relation entre ces phénomènes et le diamètre de sédiments en suspension.

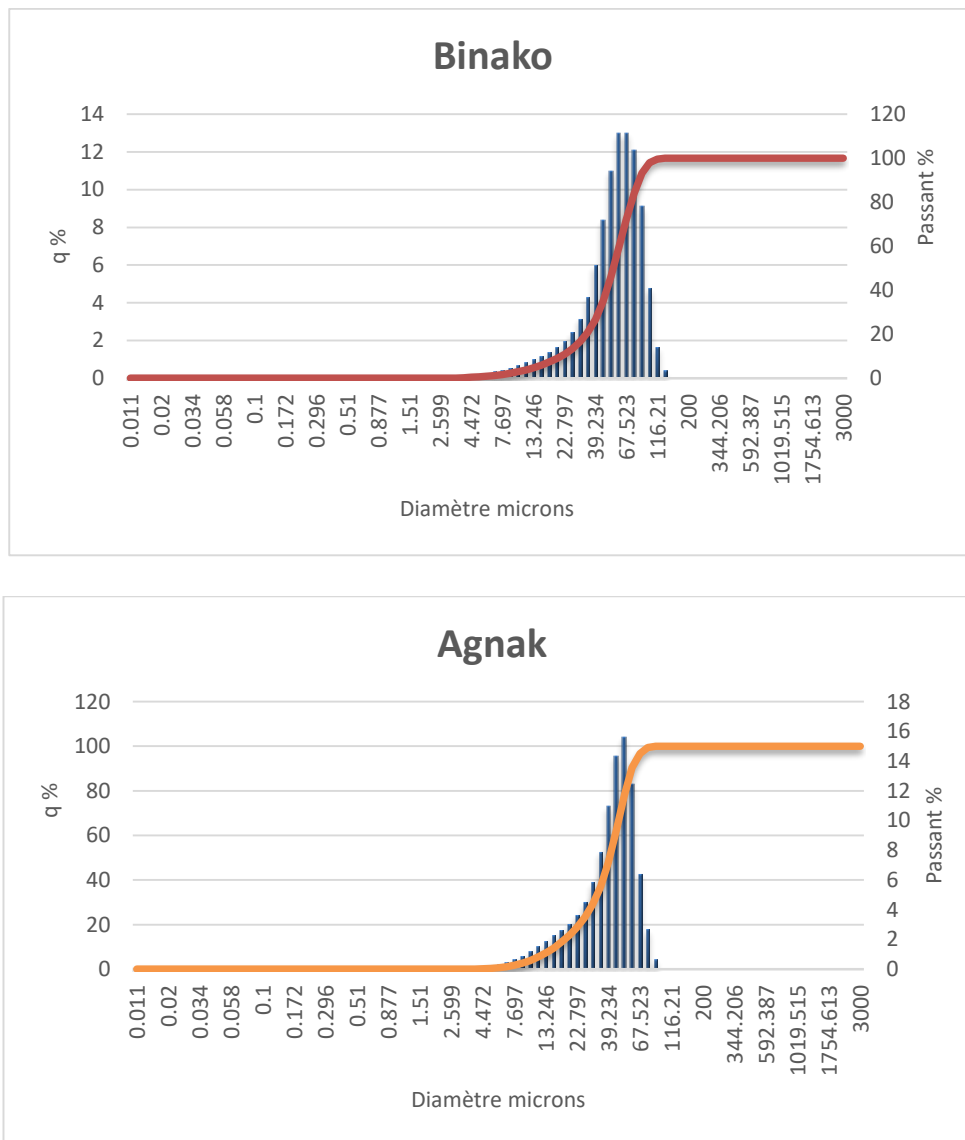


Figure 39 : Volume des particules des échantillons prélevés à Binako et à Agnak

Conclusion du chapitre VI

Au terme de cette étude, les matières en suspension ont été évaluées à l'exutoire des bassins ainsi que leur distribution mensuelle et saisonnière et leurs granulométries. On doit retenir que la variabilité de la concentration calculée repose sur la fluctuation du débit des marigots. On distingue deux périodes de mobilisation importantes de matières en suspension sur les

deux méthodes étudiées dans ce travail : la saison des pluies et la saison hors pluies. Pour les réflectances dans le PIR des images Land Sat8, il a été distingué que les sédiments sont plus importants dans la période de décembre et janvier. Les analyses mensuelles de la concentration *in situ* de MES distinguent la saison de pluies comme période à forte charge de matières en suspension dans les marigots. L'analyse de la relation Mes et Réflectance montre une corrélation positive 0,35 sur les flux de sédiments dans les deux marigots. De plus, l'analyse granulométrique a révélé des diamètres variables des particules de sédiments sur les sites échantillonnés. Ces résultats démontrent que les processus de sapements et de transport de ces particules fluctuent en fonction du contexte pédologique, écologique et socio-économique de la zone. Cet état de fait indique que la distribution annuelle des sédiments sur l'exutoire des deux bassins repose sur le fonctionnement hydroclimatique des marigots des bassins-versants de Djibonker et Agnak. Ce fonctionnement va nécessiter une appréciation de l'occupation des sols, du ruissellement et de la perte des terres à l'échelle des bassins étudiés.

Conclusion de la deuxième partie

Dans cette deuxième partie, il est ressorti de l'analyse que les ressources en eau sont relativement impactées par les dynamiques climatiques et pratiques socioéconomiques importantes. L'évaluation des eaux de surface par gravimétrie effectuée à l'aide des données GRACE a montré une variabilité spatio-temporelle du stockage d'eau au niveau des stations de ziguinchor, Bounkiling, Bignona et Oussouye de 2003 à 2005. Cette variabilité n'est pas sans conséquences pour l'alimentation des nappes qui sont dans une dynamique d'exploitation relativement importante, même si, les prospections des indices d'eau souterraines indiquent des potentialités relativement importantes d'eau dans les bassins-versants de Djibonker et d'Agnak.

La cartographie du risque d'inondation indique également des sensibilités élevées au risque d'inondation en période de crues qui peuvent mobiliser des matériaux détritiques. Les événements de crues déterminées par le modèle HEC-HMS montre différents épisodes de crues et une évolution des coefficients de ruissellement entre 2004 et 2020. Ces épisodes de ruissellements sont conditionnés par les manifestations pluviométriques et les pratiques liées à l'occupation des sols. En ce sens, il est opportun d'étudier la dynamique des états de surfaces pour mieux déterminer le ruissellement et évaluer les matériaux détritiques sapés par ces eaux ruisselées.

TROISIÈME PARTIE

DYNAMIQUE DES ÉTATS DE SURFACE DU SOL ET CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE RUISSELLEMENT ET D'ÉROSION

Dans cette partie de la Casamance où les activités socio-économiques des populations sont orientées plus vers l'agriculture pluviale, les conséquences des changements globaux se font sentir sur l'environnement biophysique. Le développement des activités agricoles repose sur la durée de la pluviométrie qui alimente le plus les rivières et les vallées. Or, la Casamance a subi les conséquences néfastes de la variabilité climatique dont la réduction drastique des surfaces rizicoles emblavées et la migration de la main d'œuvre. Par ailleurs, au-delà de ces contraintes, s'ajoute la dégradation des terres sous la pression de nouvelles cultures. Face à ces réalités, les communautés ont développé de nouvelles formes de cultures résilientes au changement climatique pour répondre à leurs préoccupations alimentaires et améliorer leur situation économique. Ainsi, comme tous les territoires de la Casamance, une dynamique évolutive est constatée dans les bassins de Djibonker et d'Agnak depuis les modifications hydrologiques enregistrées au début des années 1970.

Dans cette partie, nous avons analysé la dynamique de l'occupation des sols et les différentes formes de mutations environnementales et socio-économiques.

Dans le premier chapitre, les types d'occupation des sols sont examinés de même que les changements enregistrés de 1968 à 2022 sur les deux bassins versants. Le deuxième chapitre traite des impacts des changements d'occupation des sols sur l'érosion hydrique. Dans le troisième chapitre, on aborde les mutations socioéconomiques et environnementales dans les territoires des bassins d'étude.

CHAPITRE VII : LA RECOMPOSITION DES TERRITOIRES, UNE CONSÉQUENCE DE LA DYNAMIQUE DES UNITÉS PAYSAGÈRES

Les bassins versants de Djibonker et d’Agnak font partie des terroirs peu étudiés. En effet, les localités de ces bassins ont connu des mouvements (déplacement des populations, abandons de villages, vol de bétail, etc.). Depuis 2004, période d’accalmie de la crise politique, la reprise des activités socioéconomiques a donné un regain d’espoir dans la zone, avec notamment le retour des populations dans leurs terroirs respectifs. De par le développement agricole, de nouvelles pratiques agricoles sont développées occasionnant ainsi des modifications dans l’occupation des sols. Ce chapitre répond à deux objectifs. Il s’agit d’abord d’analyser l’occupation des sols sur différentes dates et de déterminer les changements d’occupation des sols intervenus dans les bassins versants étudiés en relations avec les activités de production. Il s’agit également d’analyser les facteurs à l’origine de la dynamique et les impacts de la recomposition socio-spatiale sur l’écoulement.

VII.1. Méthodologie utilisée pour le traitement des images satellitaires

Les images Corona 1968, Earth 2004 et Bing Map 2020 ont été utilisées dans le cadre de l’analyse de l’occupation des sols.

- ✓ 1968 concerne l’image corona qui constitue la période de référence par rapport à l’évolution des paysages agraires (Ba, 2020). Les images du Satellite Corona de la mission américaine étant de qualité panchromatique « noir et blanc » ont une résolution importante et couvre toute la Casamance.
- ✓ Earth 2004, le choix de cette date s’explique du fait que les terroirs des deux bassins ont été fortement touchés par le conflit armé en Casamance. A cette date, un nombre considérable de populations déplacées à l’époque avaient commencé à regagner leurs villages d’origine. Ce mouvement n’est pas sans conséquence sur la configuration ou l’organisation actuelle des terroirs.
- ✓ 2020 est la date récente retenue de l’étude et possède des images Bing Map de qualité lisibles et faciles d’accès pour la zone d’étude. Ces différentes dates constituent la base de numérisation de la zone d’étudiée.

VII.1.1. Justification des classes d’occupation des sols

Dans cette rubrique, la zone est répartie en différentes unités du paysage. L’analyse s’est faite sur la base des données des trois années de référence : 1968, 2004 et 2020. Sur la base du traitement d’images et de l’interprétation visuelle, nous avons identifié 7 unités

paysagères. Tout d’abord, les unités ont été classées en deux groupes : unités physiques et unités anthropiques : le premier groupe englobe les cours d’eau, la mangrove, les rizières, les tannes, végétation de terre ferme. Le deuxième intègre les cultures de plateau et les zones d’habitat. Les différentes classes utilisées et leurs explications sont consignées dans le tableau 38.

Tableau 38: Classes d’occupation des sols à l’échelle d’un bassin versant

Classes	Explications
Surface d’eau	Eau libre, simple
Végétation de terre ferme	Savane, petites forêts arbustives
Mangrove	Peuplements forestiers se développant dans la zone intertidale, composés d’arbres et d’arbustes dont les pieds sont couverts par la marée de manière permanente ou temporaire
Tanne	Terre salée, gris ou roussâtre
Zone de culture de plateau et sol nu	Aires exploitées ou sous exploitation pour la culture pluviale ou de contre saison, ferme, verger, etc.
Rizière	Culture de bas-fonds exploitée ou abandonnée
Zone d’habitat	Construction (maisons, infrastructures, etc.)

VII.1.2. Importance de l’occupation des sols dans le processus d’infiltration et de ruissellement

L’occupation des sols s’avère de plus en plus indispensable, à la fois pour la connaissance d’un territoire et pour son aménagement (Kpedenou *et al.*, 2016). Elle aide à avoir une meilleure compréhension des différentes tendances dans les processus de transformations spatiales (Lambin *et al.*, 2001 ; Kpedenou *et al.*, 2016). L’occupation des sols est assujettie aux besoins des populations et des pratiques en cours.

VII.2. Analyse des états de surface en 2004 à Djibonker et Agnak

Sept classes d’occupation des sols apparaissent sur la production cartographique obtenue. Il s’agit des unités d’occupation des sols composées de zones de cultures de plateau, mangrove, végétation de terre ferme, surface d’eau, tannes, rizières et zones d’habitats. A Djibonker, l’unité spatiale « zones de cultures de plateau et sols nus » occupe la plus grande superficie (39,62 %) contrairement à Agnak où l’unité spatiale « végétation de terre ferme » a un taux d’occupation de 75,76 %, donc le plus élevé (tableau 39). L’unité spatiale « zone

de cultures de plateau » est la deuxième classe d'occupation des sols dans le bassin d'Agnak (13,73%). L'unité paysagère « rizière » occupe respectivement 16,38 % et 8,78 % à Djibonker et Agnak pour la même année tandis que la classe d'occupation « tanne » occupe 4,13 % à Djibonker et 1,45 % à Agnak. Les unités paysagères mangroves 0,1 % et 0,005 % ; surface d'eau 0,66% et 0,23 % et les habitations 0,10 % et 0,04 % sont faiblement identifiées respectivement dans les bassins versants de Djibonker et Agnak (tableau 39). Les habitations moins importantes identifiées en 2004 sont dues aux impacts de la crise ayant entraîné le déplacement d'une frange importante de la population. Elle a aussi entraîné le développement de la végétation non loin des habitations et des rizières. Une telle situation est notée dans les villages de Boffa et Bouhouye où la végétation est assez importante contrairement aux habitations, très faibles. Quelques constructions sont identifiées dans les villages de Toubacouta et Darsalam. Les villages de Bourofaye Bainouck et Mpack ont été les sites où les habitations étaient plus concentrées à l'époque.

Dans le bassin d'Agnak, en 2004, on voit à peine des habitations dans les villages du LYNS¹ et à Tourécounda.

Tableau 39 : Statistiques sur l'occupation des sols en 2004 à Djibonker et Agnak

Classes		Djibonker		Agnak	
		Superficie en (ha)	Fréquence%	Superficie en (ha)	Fréquence%
	Mangrove	0,66	0,01	0,78	0,00
	Rizière	1765,76	16,38	1392,13	8,78
	Surface d'eau	70,97	0,66	37,17	0,23
	Tanne	445,81	4,13	229,54	1,45
	Végétation	4215,86	39,10	12005,59	75,76
	Zone d'habitat	11,21	0,10	5,91	0,04
	Cultures de plateau et sol nu	4272,69	39,62	2176,47	13,73
	Total Général	10782,96	100	15847,59	0,00

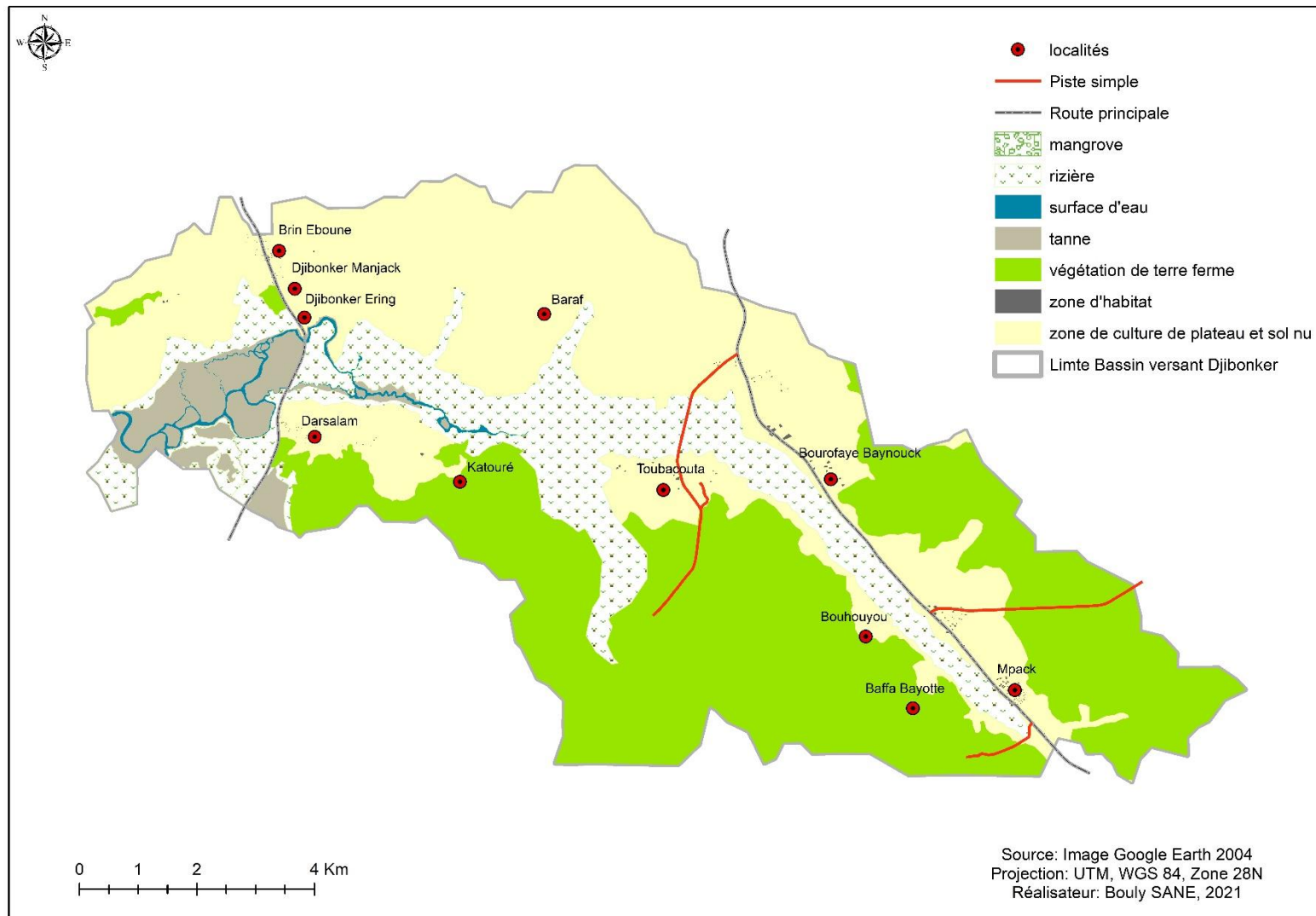
¹ LYNS : Laty, Yabone, Niadiou et Samick (Fédération des villages en retour de la commune de Boutoupa).

VII.3. Analyse de l'occupation des sols en 2020

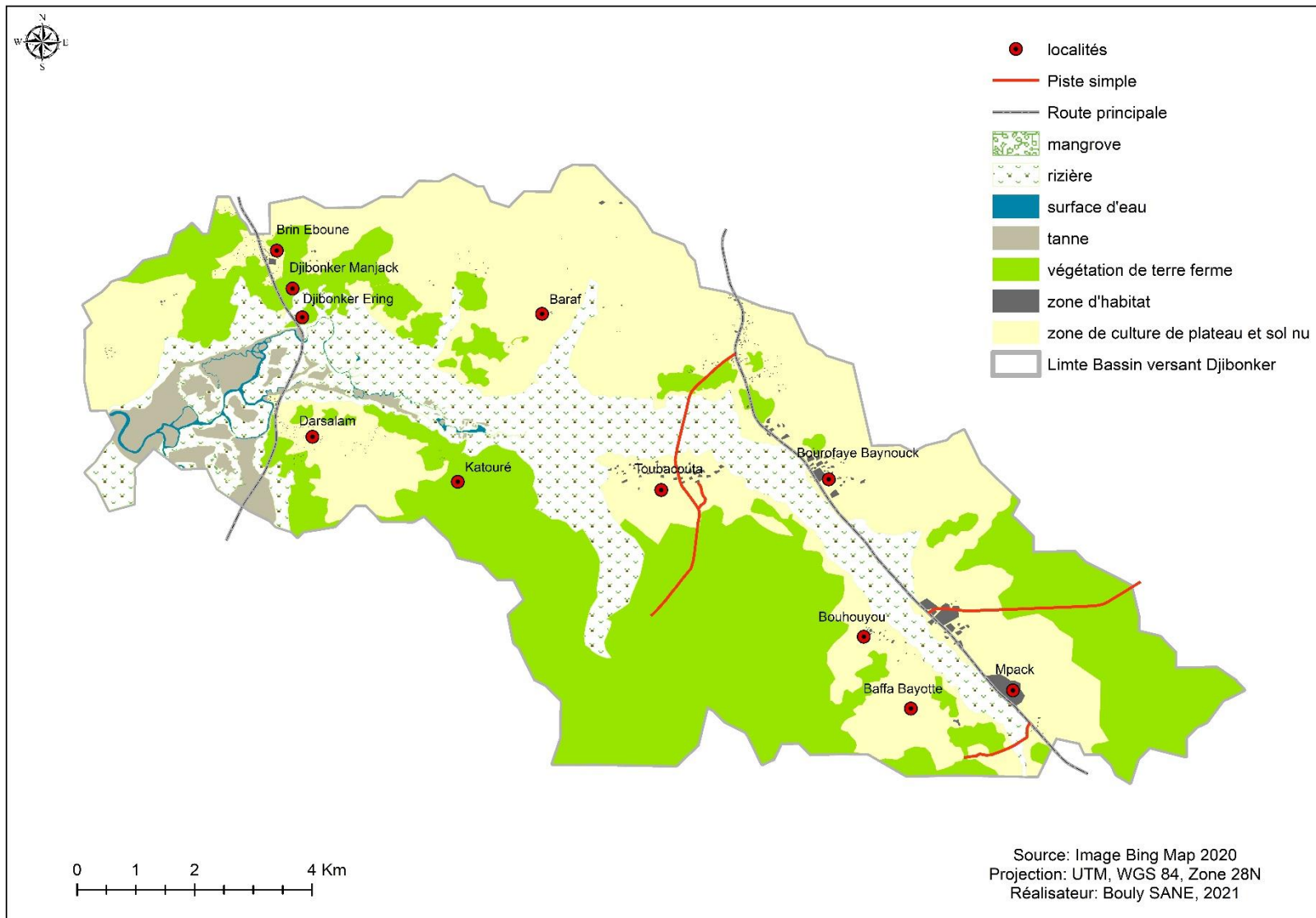
L'état de l'occupation des sols en 2020 révèle une forte proportion de la classe « zone de cultures de plateau et sols nus » à Djibonker et de la classe « végétation de terre ferme » à Agnak. Ces deux classes occupent respectivement 40,82 % et 60,61 % des superficies des bassins (tableau 40). On note également les classes d'occupation « rizières » qui ont connu une augmentation de superficies contrairement à l'année 2004. Elles sont de 19,05 % à Djibonker et 9,11 % à Agnak. Pour la même année toujours, on constate que les surfaces de tannes sont moins importantes, 3,12 % et 1,14 % de la superficie totale des classes étudiées (tableau 40). Il est remarqué aussi que les superficies occupées par les eaux de surface sont moins importantes 0,50 % et 0,15 % respectivement à Djibonker et Agnak.

Tableau 40 : Statistiques sur l'occupation des sols en 2020 à Djibonker et Agnak

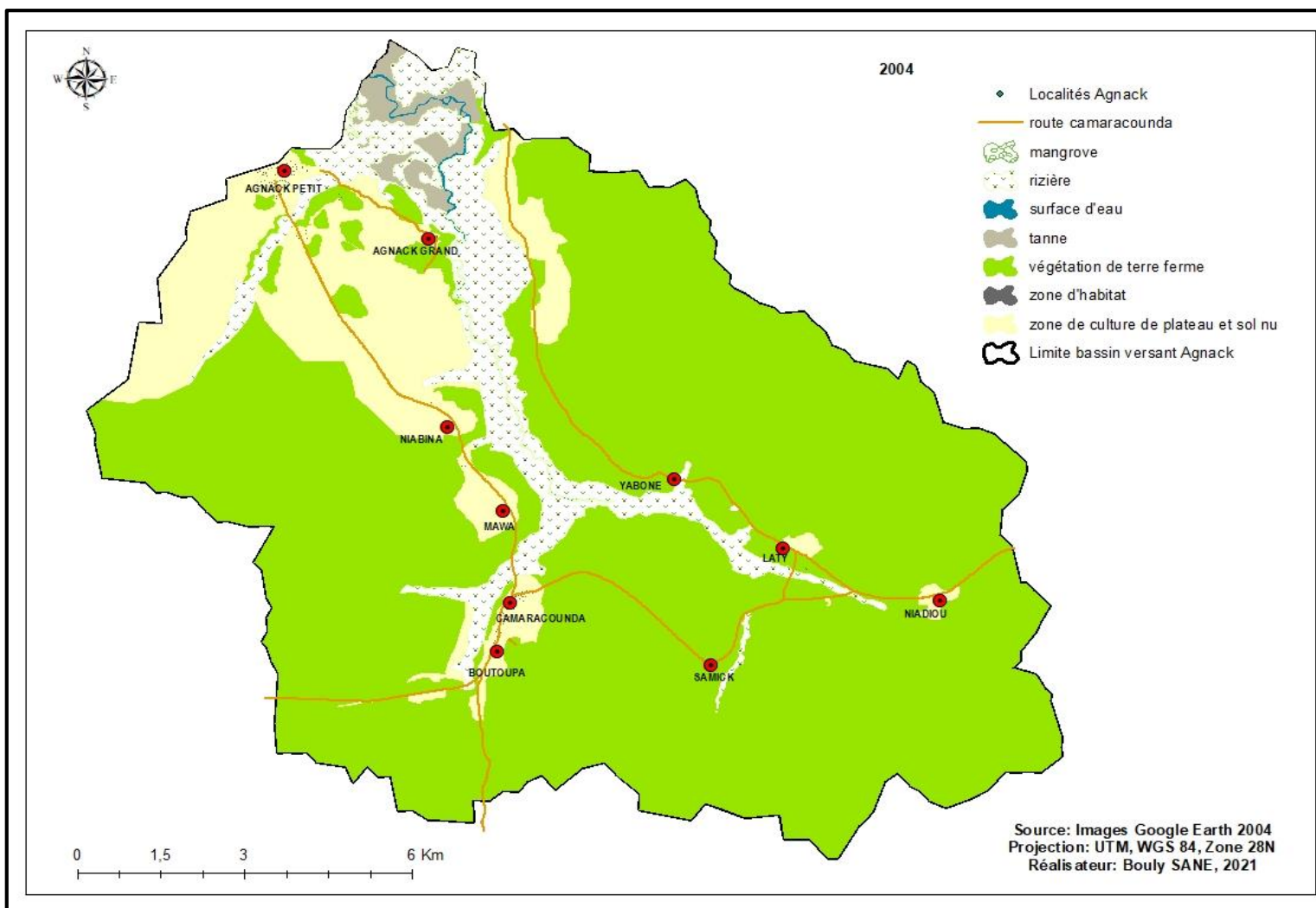
		Djibonker		Agnak	
		Superficie en (ha)	Fréquence%	Superficie en (ha)	Fréquence%
Classes	Mangrove	0,92	0,009	12,65	0,08
	Rizière	2055,07	19,058	1443,95	9,11
	Surface d'eau	54,74	0,508	24,39	0,15
	Tanne	336,71	3,123	180,83	1,14
	Végétation	3864,67	35,840	9605,07	60,61
	Zone d'habitat	68,94	0,639	12,45	0,08
	Cultures de plateau et sol nu	4401,94	40,823	4568,25	28,83
	Total Général	10783,00	100	15847,59	100



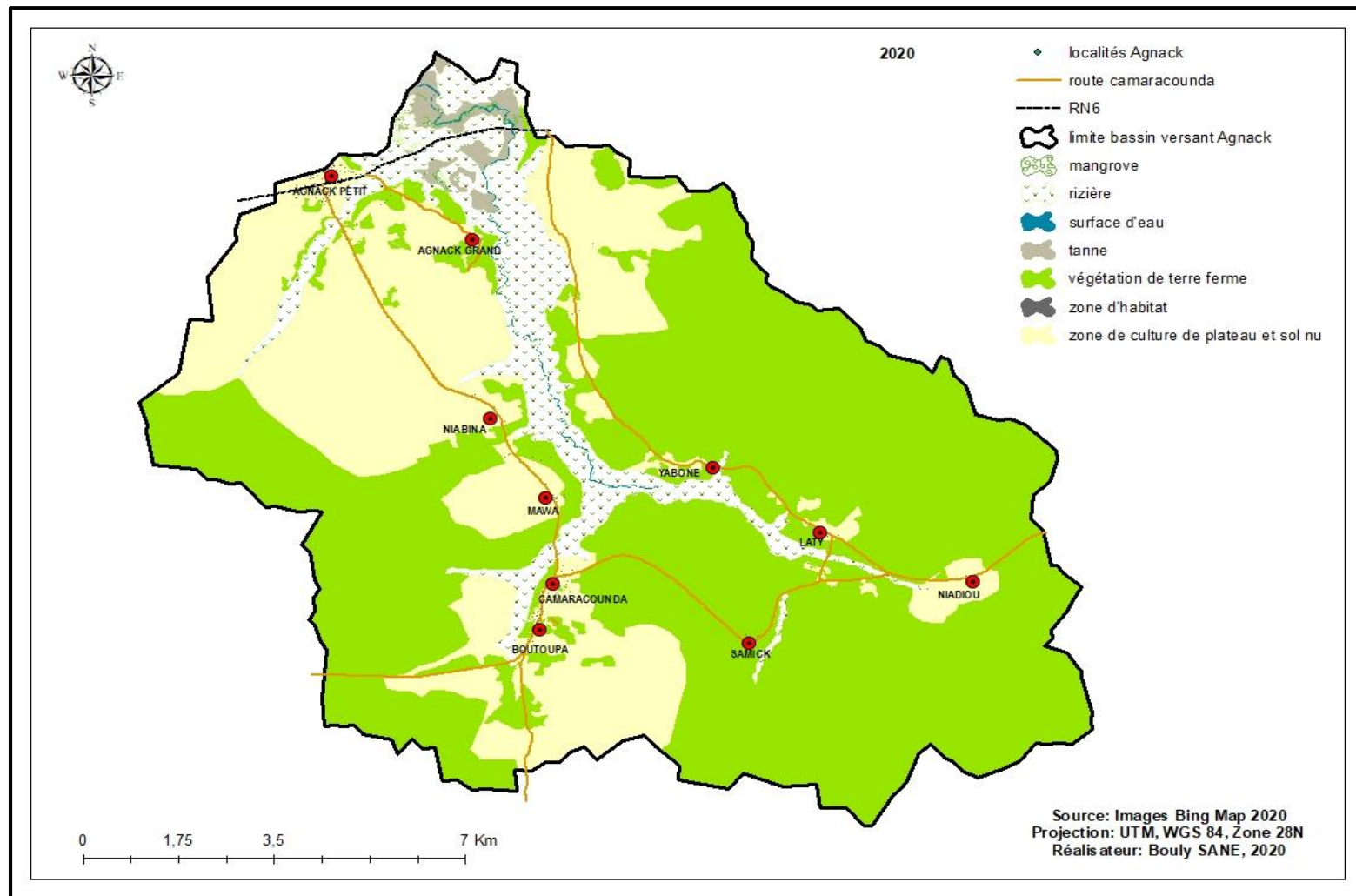
Carte 33 : Occupation des sols dans le bassin versant de Djibonker en 2004



Carte 34 : Occupation des sols dans le bassin versant de Djibonker en 2020



Carte 35 : Occupation des sols dans le bassin versant d'Agnak en 2004



Carte 36 : Occupation des sols dans le bassin versant d'Agnak en 2020

VII.4. La dynamique des unités spatiales des bassins étudiés

Les résultats de l'occupation des sols des bassins étudiés montrent des évolutions des unités spatiales de 2004 à 2020 sur les deux sites d'études. Les superficies de cultures de plateaux et sols dénudés ont connu une forte évolution entre 2004 et 2020. En 2004, les superficies des cultures de plateau étaient à un taux de 13,73 % et sont passées de 28,83 % en 2020, soit une croissance de 15,1 %. Cette dynamique progressive peut s'expliquer par la conversion des exploitants agricoles vers l'agriculture fruitière et l'arboriculture. La superficie de la végétation de terre ferme a régressé entre 2004 et 2020 (75,76 et 60,61 %) à Agnak. Les superficies de mangrove ont augmenté légèrement entre 2004 et 2020 (0,78 à 12,65 ha).

L'analyse détaillée de données indique des changements ou évolutions considérables. En 2004, à Djibonker, « les terres de cultures de plateau » représentent 39,62 % de la superficie du bassin contre un taux d'occupation de végétation de terre ferme de 39,12 %. En 2020, de faibles régressions sont notées sur cette même unité.

VII.4.1. Les facteurs des dynamiques socio-spatiales des territoires

Il faut dire que les mouvements des communautés dans les territoires du bassin d'Agnak et de Djibonker sont corrélés aux événements politico-militaires en Casamance. En dépit des impacts de la variabilité climatique qui a entraîné une baisse de la main-d'œuvre rurale, les populations s'orientent le plus vers des activités agricoles plus rentables. Cette affirmation corrobore la logique de Diohy *et al.* (2016) selon laquelle les changements d'usage du sol sont fortement dus aux activités humaines. Le désir de rejoindre sa famille et/ou son terroir (58,26 %) constitue la préoccupation qui anime le plus les populations des terroirs enquêtés. Plus développée par les communautés, l'agriculture est le deuxième intérêt qui anime la dynamique de l'occupation des terroirs des bassins versants de Djibonker et d'Agnak selon les populations interrogées. En effet, 21,81 % des répondants ont dit être motivés par la prospérité des terres de la zone à usage agricole (fig. 40). Les raisons économiques sont un facteur évoqué par 10,59 % des populations interrogées. Parmi ces derniers, la position stratégique des villages de la commune de Boutoupa-Camaracounda à savoir Mpack, Samick, Niadiou et Boutoupa favorisent le développement du commerce transfrontalier avec la Guinée-Bissau. Des commerçants bissau-guinéens regagnent ces villages au début de campagne agricole pour l'achat de pastèques et de produits horticoles.

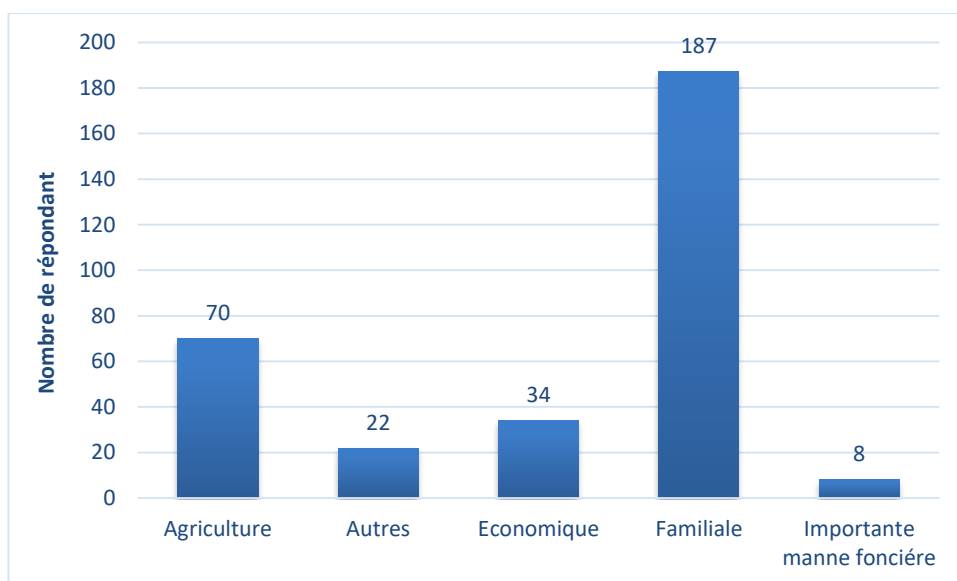


Figure 40 : Intérêts de l'occupation des sites étudiés selon les répondants

VII.4.2. Impacts des pratiques humaines sur les états de surface

Les réponses des populations interrogées indiquent une tendance progressive de certaines unités paysagères dans les bassins d'étude. Pour l'unité végétation de terres ferme, certaines pensent constater une régression de la végétation naturelle au profit des terres de cultures, de vergers et des habitations. Ce point de vue est partagé par 17,8 % des personnes interrogées. Les appréciations diffèrent selon les réponses collectées auprès des populations. Elle est considérée comme dense par 24 % des répondants, moins dense par 39,9 % des personnes interrogées (tableau 41). Ces perceptions sont corroborées par les résultats de la cartographie diachronique sur les deux années. D'autres semblent n'avoir aucune idée (8,1 %) sur l'état de leur paysage du fait qu'ils n'y prêtent pas trop attention.

Tableau 41: Perception de la population sur l'état de la végétation naturelle

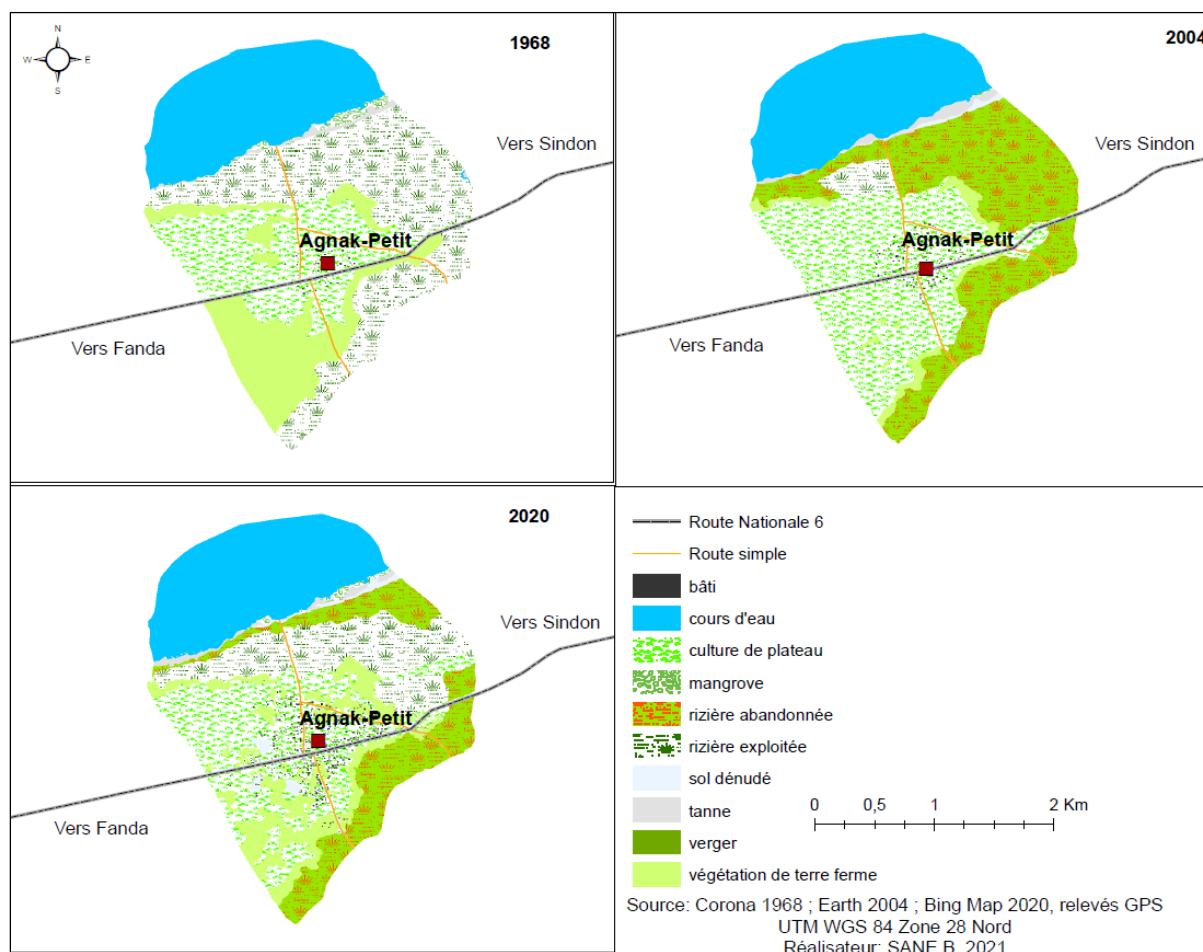
Points de vue des populations	Ne sais pas	Dense	Moins dense	Régression	Constante	Total
Nombre de répondants	26	77	128	57	33	321
Fréquence	8,1	24,0	39,9	17,8	10,3	100

VII.5. Des mutations de quelques terroirs de la zone d'étude

Quatre terroirs répartis dans les deux bassins d'étude ont été étudiés. Il s'agit des terroirs de Boutoupa, Agnak, Darsalam et Mpack. Nous avons eu le choix de travailler sur deux terroirs par bassin-versant pour une lecture fine de la dynamique de l'occupation des sols. Pour chaque bassin, un terroir en amont et en aval de l'exutoire a été retenu pour comprendre les mutations survenues entre 1968 et 2020.

VII.5.1. Les mutations dans le terroir villageois d'Agnak-Petit de 1968 à 2020

Agnak-Petit est situé dans une zone de palmeraie (palmiers huile) où on récolte beaucoup de vin de palme. Son nom Agnak vient de l'appellation des entonnoirs en feuilles de palmiers utilisées pour le vin de cet arbre, gunak (singulier) et hanak (pluriel) en Bainouck. Traversée par la route nationale n°6, le village d'Agnak offre à son entrée vers l'Ouest un domaine réservé à l'habitation et, à sa sortie vers l'est un autre domaine de plus de trois 03 (km) réservé à la riziculture non loin du fleuve Casamance offrant un sol argileux propice à la poterie. Ces dernières décennies, avec la variabilité climatique et ses corollaires, ce terroir connaît de réelles mutations socioéconomiques et environnementales (carte 37).



Carte 37 : Occupation des sols de 1968 à 2020 dans le terroir villageois d’Agnak-Petit

La cartographie de l’occupation des sols du terroir d’Agnak-Petit indique d’importantes mutations sur une période comprise entre 1968 et 2020.

De 1968 à 2004, les superficies de la classe d’occupation « cultures de plateau » ont connu un accroissement significatif. Elles sont passées de 28,3 ha à 215,8 ha soit une augmentation de 187,3 ha. En 2020, les terres de cultures ont aussi connu une baisse (153,3 ha) soit un bilan négatif de -62,5 ha. Pour la même année, les superficies des « rizières abandonnées » ont quasi doublé (fig. 41). En raison de l’avancée de la langue salée et de la dégradation d’une bonne partie des parcelles rizicoles, au courant de cette année, les habitudes culturelles des populations se sont orientées le plus vers la terre ferme. Également,

une légère régression des classes de la végétation est observée entre 1968 et 2004 à l’opposé de l’année 2020 où les superficies de la végétation ont connu une augmentation de +55,39 ha entre 2004 et 2020. On note l’apparition de « rizières abandonnées » dans ce terroir à partir de l’année 2004 (fig. 41). La végétation a régressé progressivement entre 1968 et 2004 au profit des champs de cultures de plateau. La configuration des occupations des sols dans le terroir d’Agnak-Petit, n’a pas permis de ressortir les vergers car les plantations identifiées sont plus dans les espaces de « cultures de plateau ».

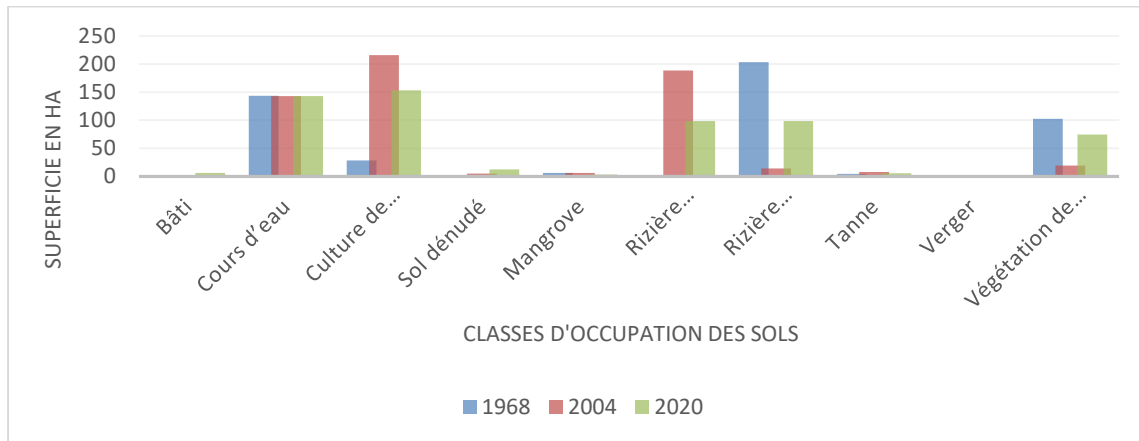
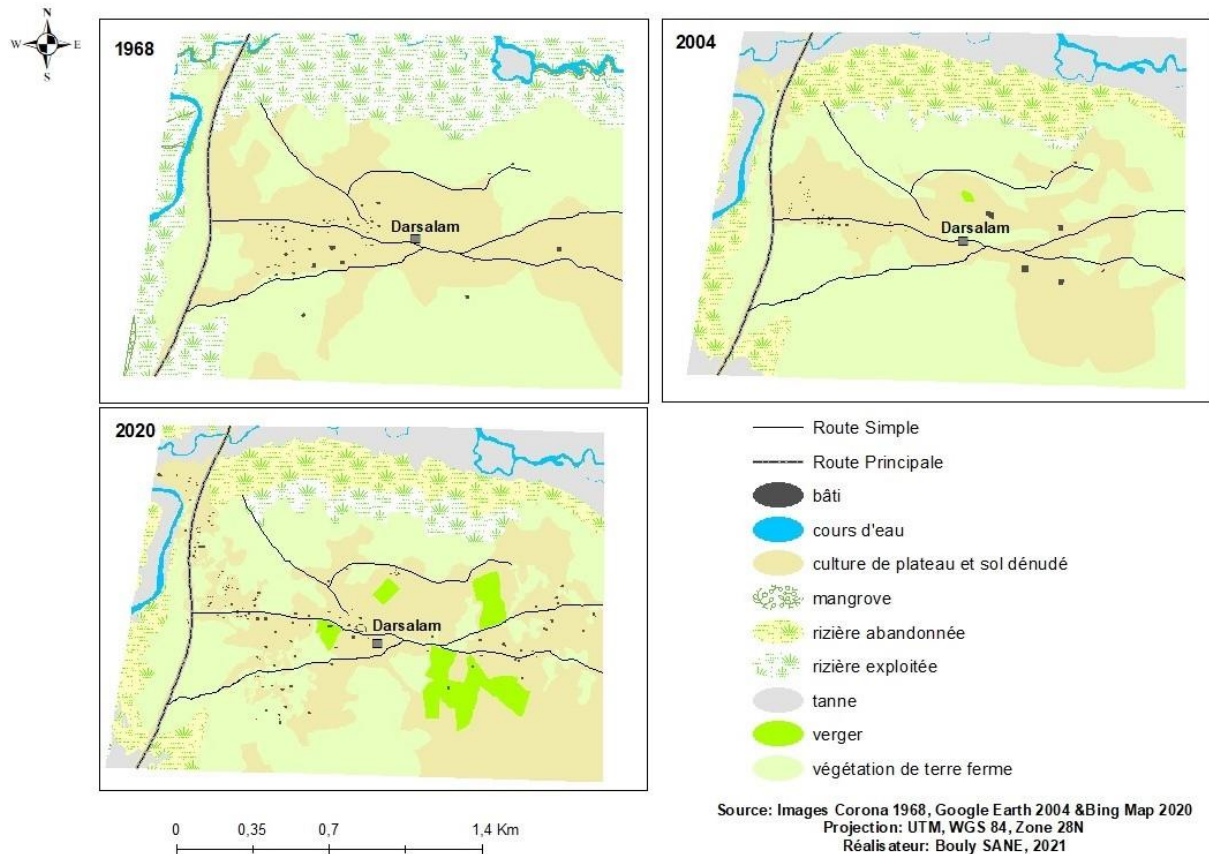


Figure 41 : Statistiques sur l’occupation des sols dans le terroir villageois d’Agnak-Petit

VII.5.2. Les mutations dans le terroir villageois de Darsalam de 1968 à 2020

Situé dans la commune de Nyassia, Darsalam est un village qui regroupe globalement une communauté Diolas et Manjacks. De par son ouverture sur l’affluent du fleuve Casamance, le Kamobeul-bolong, le village, a connu une histoire mouvementée. Les déplacements des populations sur de longues périodes ont eu des effets désastreux sur le plan économique et social. Dès lors, ces mouvements ont presque freiné la dynamique économique du village orienté le plus vers l’agriculture pluviale (riziculture et monoculture arachidière). La contrainte majeure dans ce terroir semble être l’inaccessibilité de certaines terres cultivables et des ressources forestières qui sont localisées sur des sites pas totalement déminés. Les activités actuelles identifiées sont plus développées sur la terre ferme à savoir l’arboriculture fruitière (manguier, agrumes et anacardier), le maraîchage et l’exploitation de la palmeraie

autour des habitations. Les cartes d'occupation des sols réalisées illustrent parfaitement sur les dynamiques dans ce terroir (carte 38). De 1968 à 2020, les classes d'occupation des sols identifiées ont pratiquement connu une évolution.



Carte 38 : Occupation des sols de 1968 à 2020 à Darsalam

De 1968 à 2004, les superficies de « cultures de plateau » sont passées de 106,17 ha à 89,89 ha, soit une diminution de -16,28 ha. Elles sont passées de 89,89 ha en 2004 à 123,36 ha en 2020, soit un bilan de +33,47 ha. Également, les superficies des « rizières exploitées » ont considérablement régressé de 104,53 ha à 4,76 ha entre 1968 à 2004. Entre 2004 et 2020, les superficies des classes « rizières abandonnées » ont évoluées de 51,79 à 43,23 ha (fig. 42). On observe qu'en 2004, la plupart des unités d'occupation considérées ont presque connu une baisse. On constate qu'elles ont été récupérées par les surfaces de tannes qui apparaissent nettement en 2004 (38,89 ha) contrairement à l'année 1968 qui a une superficie

de 2,25 ha (fig. 42). A noter aussi, qu'une partie des rizières de Darsalam a été abandonnée pour cause de forte présence de sel. Les parcelles exploitées et exploitables sont localisées en amont de la petite vallée de Katouré. Ces dernières décennies, la foresterie et les cultures de rente (anacarde, pastèque, etc.) ont pris le dessus sur les cultures de bas-fonds (riziculture).

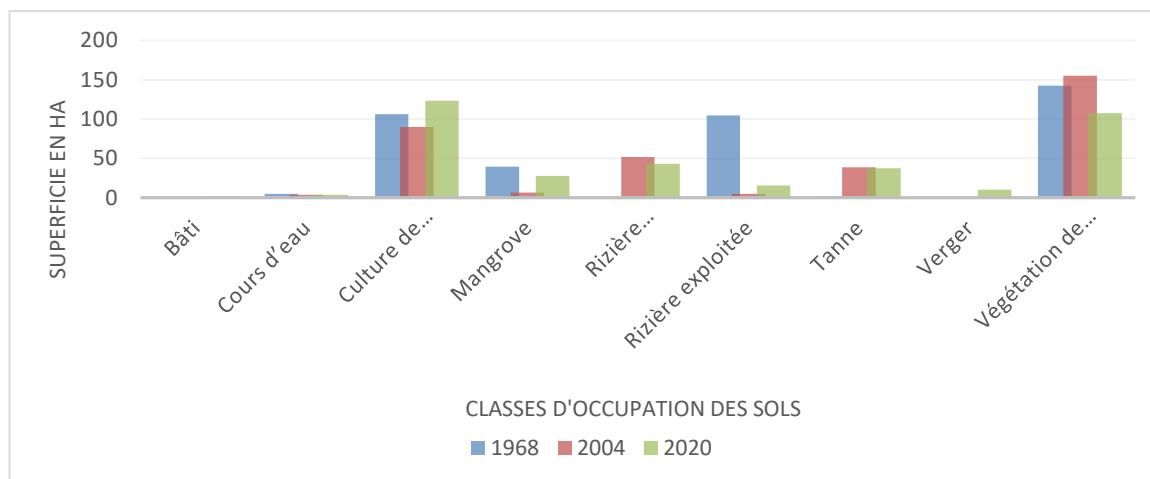
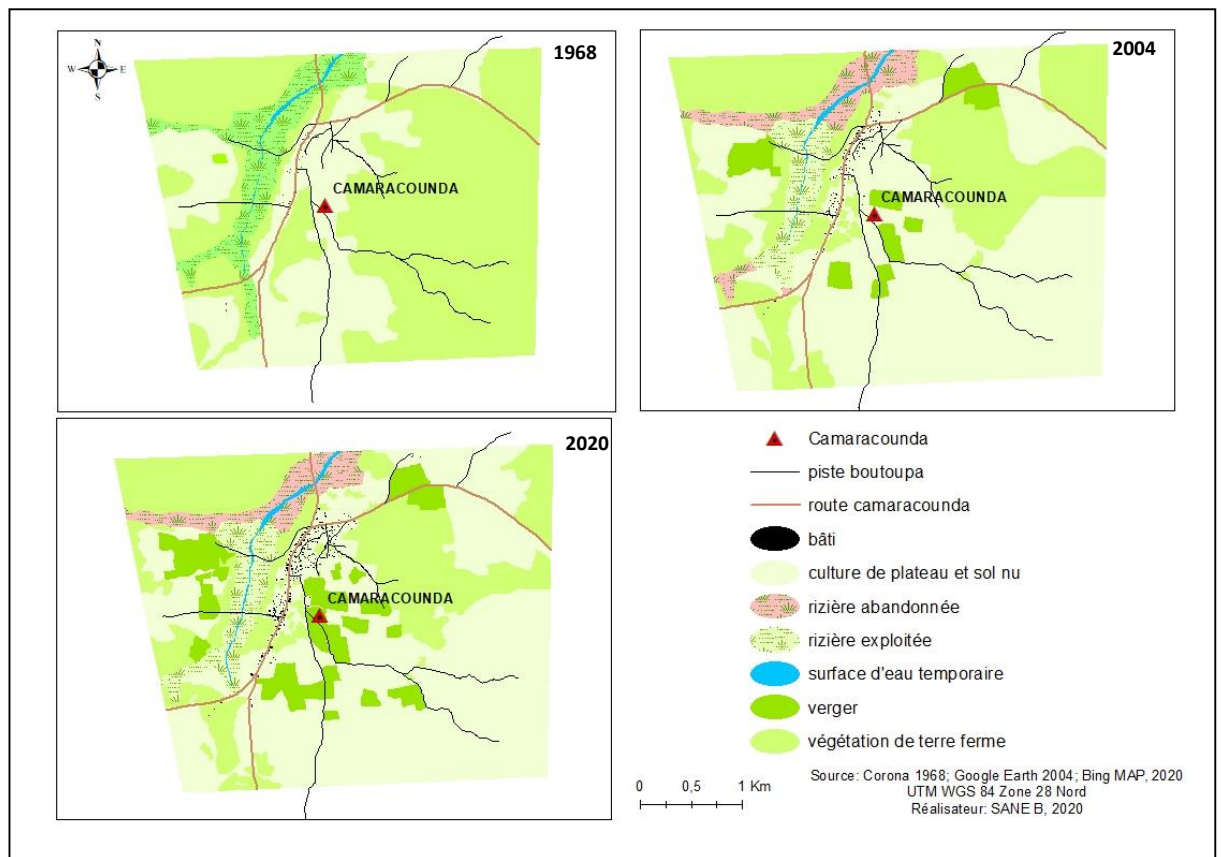


Figure 42 : Statistiques sur l'occupation des sols dans le terroir villageois de Darsalam de 1968 à 2020

VII.5.3. Les mutations dans le terroir de Camaracounda

La carte 39 présente l'état des unités paysagères de Camaracounda en 1968, 2004 et 2020. On constate une évolution sur les six (6) classes traitées. L'état des unités paysagères en 1968 indique une forte proportion de la végétation (59,45 %), des cultures de plateau (30,76 %) et une faible proportion de vergers (1,48 %). On note que les superficies occupées par les rizières exploitées et les habitations sont respectivement de 9,24 % et 0,47 % (tableau 48). En dehors de la végétation de terre ferme, les proportions de terre destinées à la culture de plateau étaient plus importantes en 1968. Cette tendance s'explique par l'érection de la politique agricole commune de l'État socialiste tournée vers la monoculture arachidière. En effet, les exploitations familiales étaient plus développées sur le plateau, malgré la disponibilité de terre de bas-fonds.

En 2004, les surfaces des rizières ont connu une forte baisse laissant apparaître une nouvelle unité de sols (rizières abandonnées ou non fonctionnelles). On remarque également, une importante augmentation des vergers au détriment de la végétation de terre ferme.



Carte 39: Occupation des sols à différentes dates autour de la vallée de Camaracounda

Tableau 42: Statistiques sur l'occupation des sols autour de la vallée de Camaracounda

Classes		1968		2004		2020	
		Superficie en (ha)	Fréquence%	Superficie en (ha)	Fréquence%	Superficie en (ha)	Fréquence%
	Bâti	0,47	0,04	2,33	0,18	4,09	0,31
	Cultures de plateau	401,70	30,76	711,85	54,52	707,06	54,15

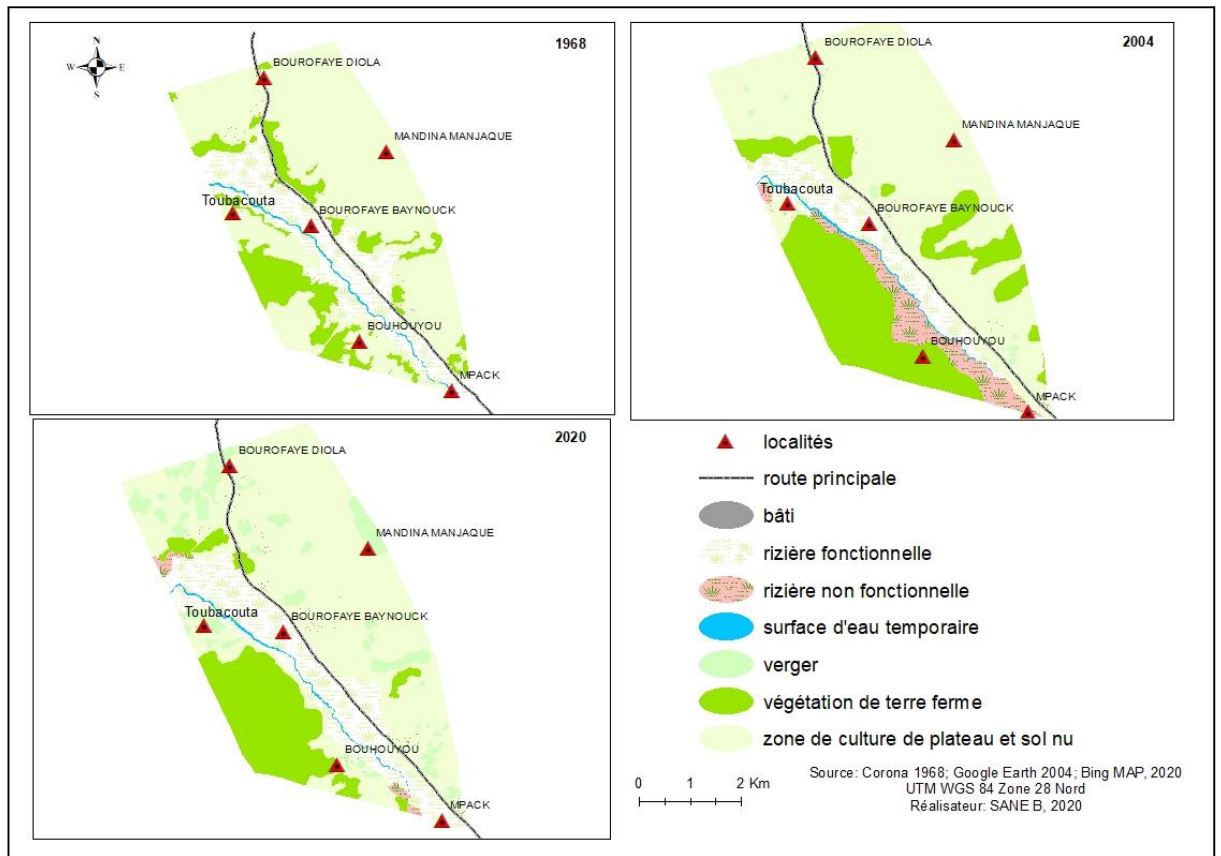
Rizière abandonnée		0,00	59,06	4,52	51,70	3,96
Rizière exploitée	120,71	9,24	54,01	4,14	59,81	4,58
Surface d'eau temporaire	5,14	0,39	5,21	0,40	6,03	0,46
Végétation de terre ferme	776,25	59,45	417,46	31,97	362,87	27,79
Verger	1,48	0,11	55,84	4,28	114,20	8,75
Total Général	1305,75	100	1305,75	100	1305,75	100

VII.5.4. Une tendance paysagère à sens inverse dans la vallée de Mpack

Au-delà des activités développées, la demande foncière a aussi connu une évolution dans le temps dans les deux zones. Les activités génératrices de revenus ont pris le dessus sur les autres formes d'occupation des sols. Ainsi, on observe pratiquement des changements au niveau des vallées et des plateaux. La carte 40 indique des évolutions sur les différentes classes d'occupation des sols.

De 1968 à 2020, on note une importante modification des unités de surface autour de la vallée de Mpack. En 1968, les surfaces occupées par les cultures de plateau étaient plus importantes (1938,67 ha), suivies des rizières fonctionnelles (682,91 ha) et de la végétation de terre ferme (442,73 ha).

Également, en 2004, les unités occupées par les rizières non fonctionnelles sont de 10,08 % de la superficie des paysages autour de la vallée, 15,12 % pour les vergers, qui en 1968, n'étaient pas identifiées dans la zone (tableau 43).



Carte 40 : Occupations des sols à différentes dates autour de la vallée de Mpack

Tableau 43 : Statistiques sur l'occupation des sols autour de la vallée de Mpack

Classes	1968		2004		2020	
	Superficie en ha	Fréquence %	Superficie en ha	Fréquence %	Superficie en ha	Fréquence %
Bâti	3,33	0,11	2,67	0,09	4,97	0,16
Cultures de plateau	1938,67	62,71	1778,17	57,52	1736,95	56,18
Rizière abandonnée		0,00	311,51	10,08	25,65	0,83
Rizière exploitée	682,91	22,09	292,34	9,46	564,25	18,25
Surface d'eau temporaire	23,98	0,78	17,38	0,56	17,51	0,57
Végétation de terre ferme	442,73	14,32	674,42	21,81	492,19	15,92
Verger	0,00	0,00	15,12	0,49	250,09	8,09
Total Général	3091,62	100	3091,62	100	3091,62	100

VII.5.5. Détection des changements intervenus entre 1968-2004, 2004-2020 et 1968-2020

L'évolution de l'occupation des sols révèle une reconversion, une modification et une légère stabilité 1968 à 2020.

A Camaracounda, la surface occupée par les rizières fonctionnelles en 1968 est remplacée par des rizières non fonctionnelles en 2004. Les terres de cultures de plateau et sols nus ont été occupées par la végétation de terre ferme. Une partie des surfaces de cultures de plateau est exploitée en vergers entre 1968 et 2004. On remarque également qu'une importante superficie de la végétation est défrichée et mise en culture, soit une progression des terres de cultures de 77,20 % entre 1968 et 2004 (tableau 44).

En 2020, les changements sont plus remarquables entre les surfaces destinées aux cultures de plateau et les vergers. En effet, la superficie des vergers a quasi doublé entre 2004 et 2020, soit une progression de 104, 51% (tableau 44). Également, quelques surfaces de rizières dégradées ont été récupérées et exploitées en contre saison par les populations. Les fortes pluies de 2020 ont permis aux habitants d'exploiter une partie des rizières abandonnées depuis les années 2000, soit une augmentation de 10,73 %.

Tableau 44 : Synthèse de l'évolution des classes d'occupation des sols entre 1968 et 2020 autour de la vallée de Camaracounda

Classes	Superficie en ha 1968	Superficie en ha 2004	Superficie en ha 2020	Progression/Régression entre 1968 et 2004	Progression/Régression entre 2004-2020
Bâti	0,47	2,33	4,09	395,74	75,53
Cultures de plateau et sol nu	401,70	711,85	707,06	77,20	-0,67
rizière abandonnée		59,06	51,7		-12,46
Rizière exploitée	120,71	54,01	59,81	-55,25	10,73
Surface d'eau	5,14	5,21	6,03	1,36	15,73

temporaire					
Végétation de terre ferme	776,25	417,46	362,87	-46,22	-13,07
Vergers	1,48	55,84	114,2	3672,97	104,51
Total général	1305,75	1305,75	1305,75		

A Mpack, entre 2004 et 2020, les changements majeurs sont notés autour de deux classes d'occupation des sols : les vergers et les rizières. Pour les vergers, leurs superficies ont augmenté de plus de 1553,43 % entre 2004 et 2020 (tableau 45). Cette hausse s'est produite au détriment des terres de cultures de plateau, pratiquement reconverties en vergers d'anacardiens, en grande partie à Bourofaye-Bainouck et Mpack. Pour les rizières, les surfaces occupées entre 1968 et 2004 ont régressé à 390,57 ha, soit une diminution de 192,34 %. La recomposition est constatée dans les terroirs de Bouhouye et de l'autre côté de Bofa, où en 2004, les 2/3 des habitants ont dû se déplacer à cause du conflit armé en Casamance. En 2020, une progression de 93,01 % des surfaces occupées par les rizières exploitées est constatée.

Tableau 45 : Synthèse de l'évolution des classes d'occupations des sols entre 1968 et 2020 autour de la vallée de Mpack.

Classes	Superficie (ha) 1968	Superficie (ha) 2004	Superficie (ha) 2020	Progression/Régression 1968-2004	Progression/Régression 2004-2020
bâti	3,33	2,67	4,97	-19,81	86,14
cultures de plateau et sol nu	1938,67	1778,17	1736,95	-8,27	-2,31
rizière abandonnée		311,51	25,65	*****	-91,76
rizière exploitée	682,91	292,34	564,25	-57,19	93,01
surface d'eau temporaire	23,98	17,38	17,51	-27,52	0,74

végétation de terre ferme	442,73	674,42	492,19	*****	-27,02
verger	0,00	15,12	250,09	*****	1553,43

Conclusion du chapitre VII

L'analyse de l'occupation des sols faite à partir de trois années de références dans les bassins d'étude indique des dynamiques contrastées des états de surface. Les cultures de plateau ont progressé entre 2004 et 2020 contrairement à la végétation au courant de la même échelle temporelle. Ces changements s'expliquent par les pratiques agricoles importantes et l'évolution des constructions après le retour des communautés dans les terroirs affectés jadis par le conflit politico-militaire. Cette même évolution est observée à l'échelle des terroirs villageois étudiés. Les unités d'occupation des sols qui ont évolué sont les rizières, la végétation de terre ferme et les surfaces destinées aux cultures de plateau. De 1968 à 2020, les superficies des rizières sont passées de 104,53 ha (1968), 4,76 ha (2004) à 15,37 ha (2020) dans le terroir de Darsalam. Pour la même classe, dans le terroir d'Agnak, on a noté des superficies de 203,43 ha (1968), 14,20 ha (2004) et 98,50 ha (2020). Les pratiques diversifiées notées dans l'occupation et l'utilisation des terres, spécifiquement dans les terroirs étudiés, ont entraîné en partie des pertes des terres.

CHAPITRES VIII : LES PERTES DES TERRES LIEES AUX MODES D'OCCUPATION DU SOL

La dégradation des sols a des effets visibles sur l'environnement physique et des conséquences socio-économiques aiguës au niveau des populations. La dégradation des sols par érosion hydrique est l'un des défis environnementaux qui entravent le développement agricole et rural dans le monde entier (Touhami *et al.*, 2014). Selon des estimations faites sur une base annuelle (Brown *et al.*, 1996), elle entraîne en moyenne une perte de 5 à 10 tonnes de sol par hectare en Afrique, en Europe et en Australie, de 10 à 20 tonnes par hectare sur tout le continent américain, et près de 30 tonnes par hectare en Asie.

La quantification et la spatialisation de l'érosion des sols constituent une approche essentielle pour l'appréhension des processus en cours sur les bassins versants (Payet *et al.*, 2012). Ainsi la modélisation de l'érosion hydrique, notamment la quantification et la cartographie de ce phénomène, constituent des éléments indispensables pour la détermination des zones d'interventions prioritaires dans le cadre des programmes de stratégies de conservation des eaux et des sols (Hermassi *et al.*, 2014). La modélisation USLE (Universal Soil Loss Equation), mise en œuvre par Wischmeier et Smith en 1978, permet d'apporter une estimation des particules de sol susceptibles d'être arrachées et de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion en nappe, sans prise en compte des dynamiques de transport/sédimentation des matières terrigènes (Payet *et al.*, 2012). Le modèle a été adapté et appliqué par certains auteurs dans des parcelles d'expérimentations en Afrique (Djoukbala, 2019 ; Payet, 2009), aux Etats Unis (FAO, 2014), en Inde (Payet, 2015), etc.

L'application du modèle à une zone donnée du globe consiste donc aujourd'hui à choisir les méthodes les plus adaptées pour le calcul des facteurs de perte ou de dégradation des sols. La robustesse, la reproductibilité à différents niveaux d'échelles et à différents milieux de ce modèle (Jabbar et Chen, 2005 ; Mati *et al.*, 2000 ; Payet *et al.*, 2012) permettent alors d'apporter les premiers éléments de réponse sur la dégradation des sols des bassins versants pour les territoires peu renseignés.

Au Sahel, les aléas climatiques extrêmes et les pratiques agricoles ont favorisé la dégradation des sols. Ces derniers sont transportés et déposés dans les lits des cours d'eau, dans les retenues des barrages, dans les lacs et dans les zones de sédimentation (Djoukbal, 2019). Dans le bassin du Djitiko, en zone soudanienne du sud Mali, Diallo (2000) a trouvé que la dégradation des sols par érosion hydrique est plus inquiétante face au changement climatique avec une anthropisation rapide conduisant à la saturation progressive des terroirs villageois.

Au Sénégal, les zones les plus affectées par le phénomène sont le Sénégal-Oriental, la Casamance et le bassin arachidier (CSE, 2009). Les résultats des projections faites par AGRHYMET sur la dynamique de l'occupation des terres au Sénégal montrent une forte pression sur l'occupation des terres par le front agricole et une forte dégradation des ressources naturelles si les pratiques actuelles ne sont pas inversées (Vidal et Djiba, 2016). Essentiel à l'économie du Sénégal, le secteur de l'agriculture exige d'investir dans des infrastructures et la promotion de pratiques agricoles durables, pour la maîtrise et la gestion de l'eau, la maîtrise de l'érosion et de la dégradation des terres (CSE, 2015 ; Vidal et Djiba, 2016, Faye *et al.*, 2022).

L'étude de Diedhiou *et al.* (2018) menée dans le bassin versant de Kissane (Thiès) montre que la dégradation des ressources naturelles (perte en sol, dégradation du couvert végétal, etc.) est due non seulement à certains effets naturels, mais aussi aux différentes interventions de l'homme, en fonction de l'ampleur de l'action des groupements humains présents sur le milieu. Dans ce contexte, l'érosion est de plus en plus active sur sol dénudé. En ce sens, des tentatives d'évaluation des pertes en sol par modélisation ont été récemment effectuées au Sénégal (Thiaw et Dacosta, 2017 ; Diédhiou *et al.*, 2018 ; Tine *et al.*, 2020 ; Faye *et al.*, 2022).

En Basse-Casamance, dans le bassin versant de Kafountine, les résultats obtenus via modélisation par Tine *et al.* (2020), montrent une perte en sol estimée à 54 t/ha/an. Dans cette étude, il était spécifiquement question d'évaluer les impacts de l'occupation et de l'affection des terres sur le sol et des stratégies de conservation traditionnelles des sols

développées par les populations dans un contexte de changement climatique. Du fait des mutations socioéconomiques et des contrastes pluviométriques, l'aléa érosion est devenu un problème majeur menaçant la pérennisation des activités économiques (Boissy *et al.*, 2022).

Dans ce chapitre, nous cherchons à évaluer les pertes en sol dans les bassins de Djibonker et d'Agnak et d'indiquer les actions de récupération développées par les acteurs.

VIII.5.2. Méthodes et données

Dans le modèle USLE (Wischmeier et Smith, 1978), la valeur de l'érosion s'établit comme suit (Kaci *et al.*, 2017) :

$$E \text{ (tons/acre)} = R \times K \times LS \times C \times P$$

Où **R** représente l'érosivité des pluies, **K** l'érodibilité des sols, **LS** le facteur topographique, **C** le couvert végétal et **P** l'occupation des sols.

Pour passer des tons/acre à des tonnes/hectare, il faut appliquer un coefficient multiplicateur de 2,24 (Kaci *et al.*, 2017).

Les cinq paramètres du modèle USLE demandent l'utilisation de plusieurs types de données. Il s'agit des données d'occupation des sols (P), de couverture végétale (C), de topographie (LS), d'érosivité des pluies (R), d'érodibilité des sols (K).

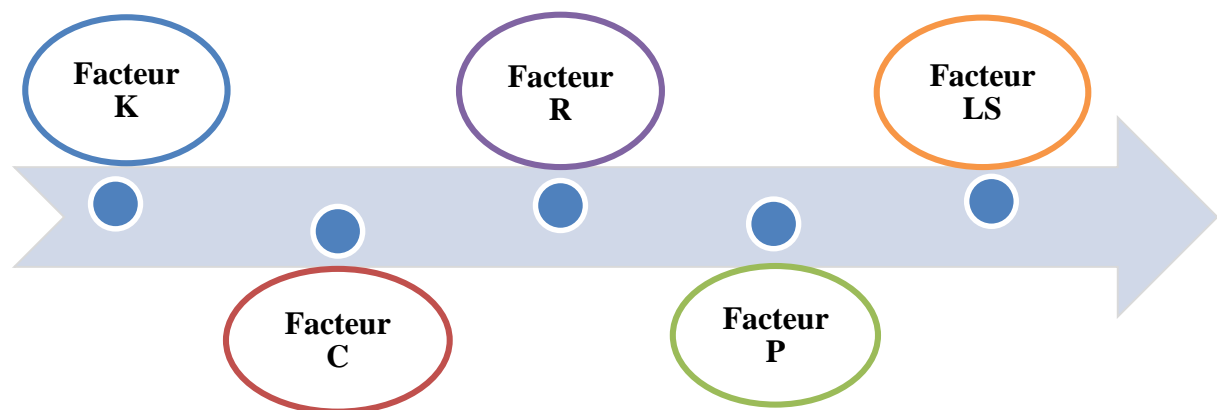


Figure 43 : Schéma du modèle de données USLE

Le choix des équations du modèle USLE n'est pas anodin. Il s'agit des facteurs qui contribuent à la perte en sols. Ils sont classés par ordre de superposition dans l'outil « raster calculator » d'Arcgis (fig.43). Le degré d'influence de chaque facteur est sujet à la réalité ou du contexte géographique dans lequel l'équation est appliquée.

VIII.1.1. Calcul de l'érosivité des pluies R

L'érosivité de pluies désigne la capacité d'une pluie à causer l'érosion (Zouagui *et al.*, 2018). La pluie est l'un des facteurs de l'érosion des sols, cela se produit lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent et arrachent les particules du sol et les emportent (Le Bissonnais *et al.*, 2002, cité par Payet *et al.*, 2012). Au cours d'une pluie, l'énergie cinétique ainsi que la quantité du mouvement dissipé lors de l'impact des gouttes permettent le détachement des particules et leur déplacement par rejaillissement (Ellison, 1944 ; Bolline, 1982 ; Djoukbal, 2019). Parmi les facteurs contrôlant l'érosion du sol et la production de sédiments, l'érosivité des précipitations, appréciée par l'indice R, a une importance primordiale. Cet indice est déterminé par l'intensité des précipitations, la réaction du bassin versant face à une sollicitation et les caractéristiques du réseau de drainage.

On observe une grande variabilité de l'indice d'érosivité dans le monde selon l'échelle spatio-temporelle. Au niveau continental, l'Amérique du Sud connaît l'indice R moyen le plus élevé avec $5874 \text{ MJ ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{an}^{-1}$, suivie par l'Afrique ($3053 \text{ MJ ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{an}^{-1}$), l'Asie et le Moyen-Orient ($1487 \text{ MJ ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{an}^{-1}$) et l'Océanie ($1675 \text{ MJ ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{an}^{-1}$) (Panagos *et al.*, 2017). En Afrique occidentale (Libéria, Sierra Leone et Guinée équatoriale), en Afrique centrale (R.D. du Congo, République du Congo et Cameroun) et à Madagascar, le facteur R annuel moyen est supérieur à $7000 \text{ MJ ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{an}^{-1}$ (Guesri, 2021). L'érosivité des précipitations est l'un des paramètres d'entrée les plus importants pour décrire les processus érosifs et proposer des mesures de conservation en utilisant des modèles de prédiction de l'érosion des sols (Panagos *et al.*, 2017).

Dans le nord-est de l'Algérie, Guesri (2021), il a trouvé, qu'en automne, 68 % de la variance de la production de sédiments s'explique par l'érosivité des pluies, contre seulement 42 %

au printemps, en raison des conditions du sol, notamment la présence d'une couverture végétale qui protège le sol contre l'érosivité des pluies.

VIII.1.2. Les facteurs topographiques LS

Le premier facteur intervenant dans la sensibilité des sols à l'érosion est la pente (Dumas et Printemps, 2010). La longueur et l'inclinaison de la pente sont parmi les facteurs qui conditionnent considérablement l'érosion des sols. La pente a une incidence importante sur le processus d'érosion hydrique ; le ruissellement est fort et rapide sur des pentes raides, toutes choses égales par ailleurs, causant ainsi une érosion hydrique très grave (Fils *et al.*, 2014 ; Yaméogo, 2021).

Une hiérarchisation du niveau des pentes est faite selon leurs degrés d'influence à la sensibilité à l'érosion des sols (tableau 46).

Tableau 46 : Hiérarchisation des pentes selon leur déclivité

Déclivité de la pente	Indicateur de sensibilité à l'érosion
0 à 10 %	Faible
10 à 25 %	Moyen
25 % et +	Forte

Source : Lagannier, 1994 ; Dumas & Printemps, 2010

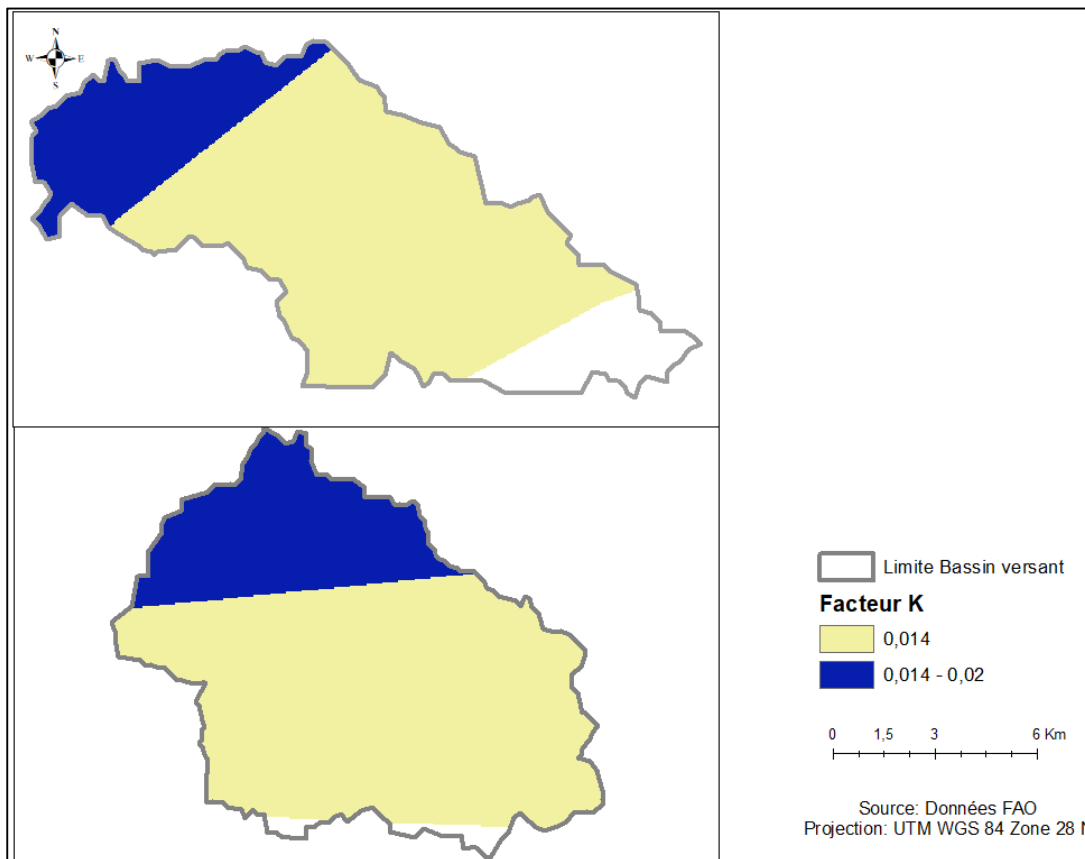
VIII.1.3. Calcul de l'érodibilité des sols K

L'érodibilité d'un sol est définie comme étant son aptitude intrinsèque à être détaché et transporté sous l'action des pluies et du ruissellement (Le Bissonnais *et al.*, 1995 ; Zouagui *et al.*, 2018 ; Bienvenu, 2019). Selon Wischmeier et Smith (1978), l'érodibilité dépend de plusieurs propriétés du sol, notamment la texture du sol, la teneur en matière organiques, la structure et la perméabilité du sol. Les données d'érodibilité ont été extraites de la base mondiale de la FAO. De ce fait, l'équation du K-Facteur développée par William (1995) a été appliquée dans ce travail pour déterminer l'indice d'érodibilité de chaque couche de sol. La formule suivante a été appliquée :

$$K = fc.sand * fcl - si * forgc * fhisand$$

Où *fc.sand* est un paramètre qui donne un facteur d'érodibilité faible pour les sols avec un contenu en sable assez élevé et un facteur élevé pour les sols avec peu de sable ; *fcl* est un facteur qui donne un facteur d'érodibilité faible pour le sol avec un grand rapport argile/silt ; *forgc* est un facteur qui réduit l'érodibilité pour des sols avec un contenu en carbone organique ; *fhisand* est un facteur qui réduit l'érodibilité de sol pour les sols avec des contenus en sable extrêmement élevé (Ntéranya, 2022).

Le facteur K varie entre 0,0026 et 0,0421 t/ha.mj.mm/an, pour les sols les plus sensibles à l'érosion (Payet *et al.*, 2011). Les résultats des cartes d'érodibilité des sols obtenus indiquent des indices d'érodibilité compris entre 0,014 et 0,02, qui sont considérés comme relativement modérés à l'érosion hydrique (carte 41).



Carte 41 : Facteur d'érodibilité des sols (K) à Djibonker et Agnak

VIII.1.4. Calcul du facteur d'occupation et de conservation des sols C et P

La couverture végétale peut jouer un rôle de stabilisateur (bloque ou réduit le transit de sédiments) du processus d'érosion hydrique (le taux de couverture végétale comparé aux autres unités paysagères). Le couvert végétal est, après la topographie, le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols (Bouguerra et Bouanani, 2016). L'indice NDVI est obtenu à travers les bandes 5 (PIR) et 4 (rouge) du satellite Landsat 8 (2020) et les bandes 4 (PIR) et 3 (rouge) du satellite Landsat 7 (2004). Les images de qualité qui couvrent la zone de travail ont été prises à la date du 25 octobre 2004 et du 12 novembre 2020. Cette période est considérée comme propice à l'activité chlorophyllienne relativement moins influencée par la pluie et le rayonnement solaire. La détermination du NDVI se fait par l'opération suivante :

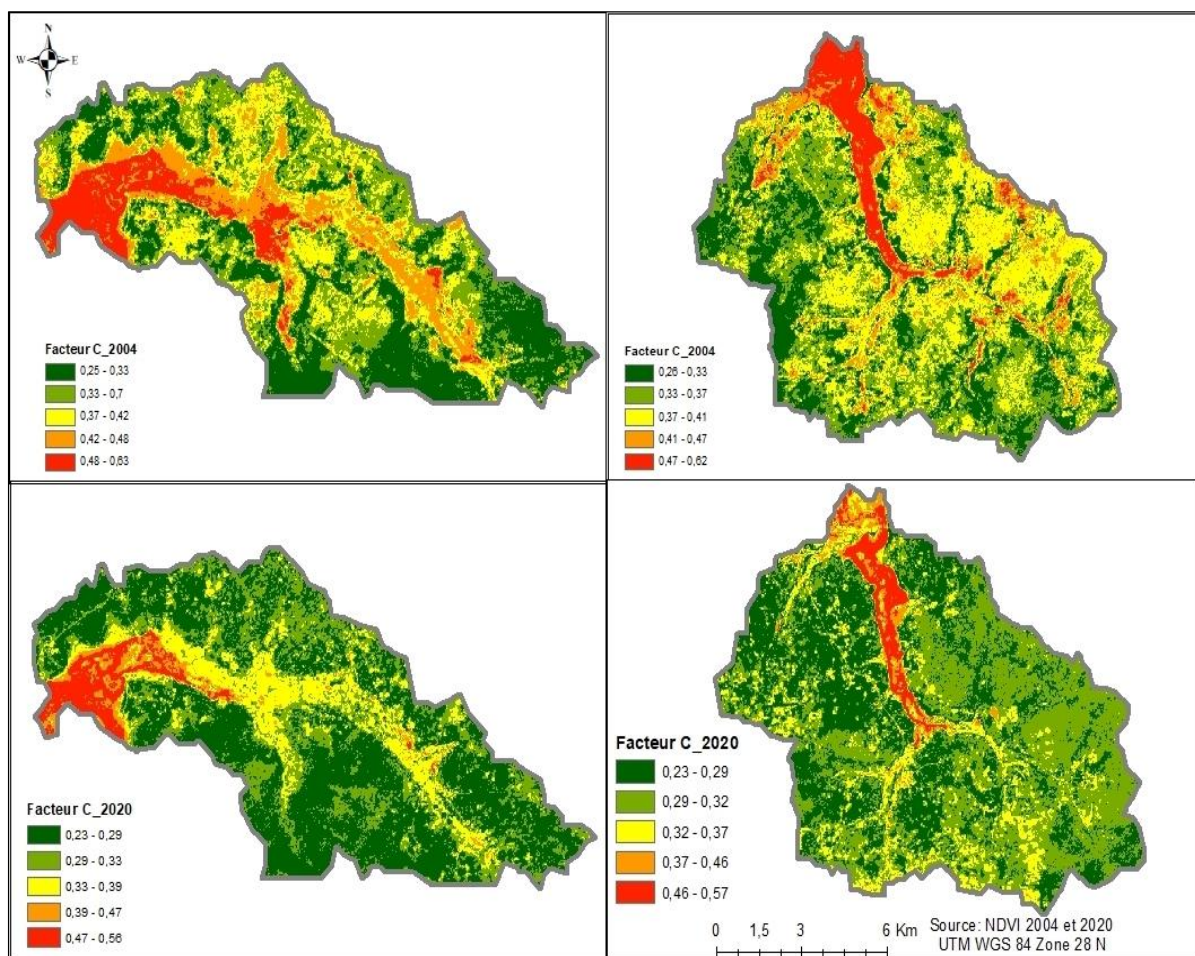
$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

La végétation a intrinsèquement un effet sur l'érosion hydrique des sols. Les ravines partiellement couvertes de végétation sont relativement stables vis-à-vis de l'érosion, mais cette stabilité varie au cours du temps, en fonction de l'influence plus ou moins pérenne des barrières végétales sur l'érosion hydrique (Rey, 2002 ; Cohen, 2005). L'ensemble des processus mis en jeu varie également en fonction des échelles spatiales : du versant au bassin versant en passant par la ravine, l'érosion hydrique se manifeste selon différents processus (diffuse, concentrée, régressive) ; la végétation peut être plus ou moins efficace pour la contrôler, puisqu'elle interagit avec sa propre dynamique spatio-temporelle (Cohen et Rey, 2005).

Pour le calcul du facteur de couverture des sols, nous avons appliqué l'équation de Durigon *et al.* (2014) utilisée en Afrique tropicale et appliquée par Phinzi et Ngetar (2019) ou encore Faye *et al.* (2022).

$$C_r = \frac{-NDVI + 1}{2}$$

Les résultats de la couverture (C) indiquent que 70 % de la superficie des bassins sont végétalisés. Elles concernent les versants est et ouest des bassins étudiés qui détiennent des indices relativement faibles (0,26-0,33) et ont une couverture végétale relativement dense. Les parties à indices élevés 0,37-0,57 (carte 42) sont les zones presque dénudées à couverture végétale faible. Elles représentent 15 % de la superficie des bassins de Djibonker et d’Agnak. Gor (2015) a montré que le risque d’érosion hydrique est plus élevé lorsque les sols sont occupés par des cultures de type sarclé peu couvrantes ou des plantes pastorales dégradées, suivies des cultures de type non sarclé, plus couvrantes, puis des prairies et des forêts denses où le risque est minimal.



Carte 42 : Evolution du facteur C de 2004 à 2020 dans les bassins versants d’Agnak et Djibonker

Les cartes du facteur C et P réalisées sont couplées aux autres facteurs calculés à partir de l'outil « Raster calculator » pour déterminer la perte en sol liée à l'érosion hydrique dans les bassins versants. La figure 44 fait la synthèse des cartes mobilisées pour la production de la carte des pertes en sols dans les bassins versants étudiés.

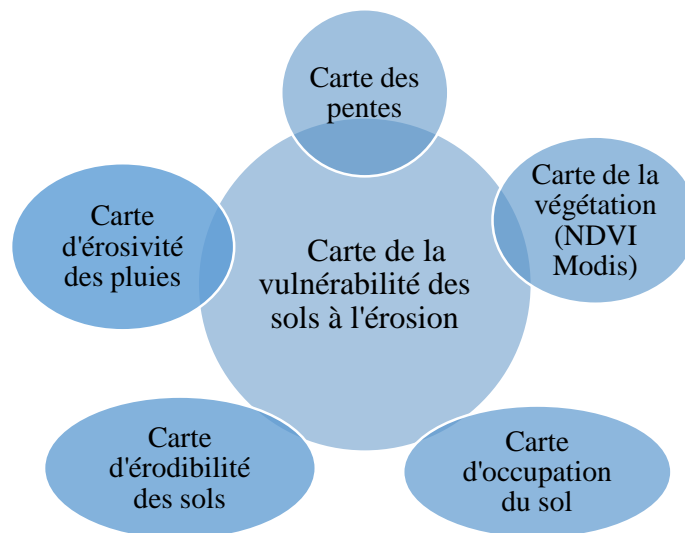


Figure 44 : Étapes de la cartographie de la perte en sols

VIII.2. État de la perte spatio-temporelle des sols dans les bassins versants étudiés

La combinaison des cartes thématiques des différents facteurs du modèle USLE a permis d'estimer les pertes en sols en t/ha/an dans les bassins étudiés à différentes échelles temporelles.

L'analyse des cartes de pertes en sols estimées est faite sur la base de la classification de la FAO (tableau 47).

Tableau 47 : Classification du degré d'érosion par le modèle USLE

Classe d'érosion du sol	Perte potentielle de sol (t/ha/an)
Très faible (tolérable)	≤ 6,7
Faible	6,7-11,2

Modéré	11,2-22,4
Haut	22,4-33,6
Sévère	≥ 33,6

Source : FAO ; Dumas, 2010.

Les pertes minimales en sols sont estimées à 0,0002 t/ha/an, tandis que les pertes maximales sont estimées à 1,31 t/ha/an (tableau 48), soit un écart de 1,13 et une moyenne de 0,38 t/ha/an.

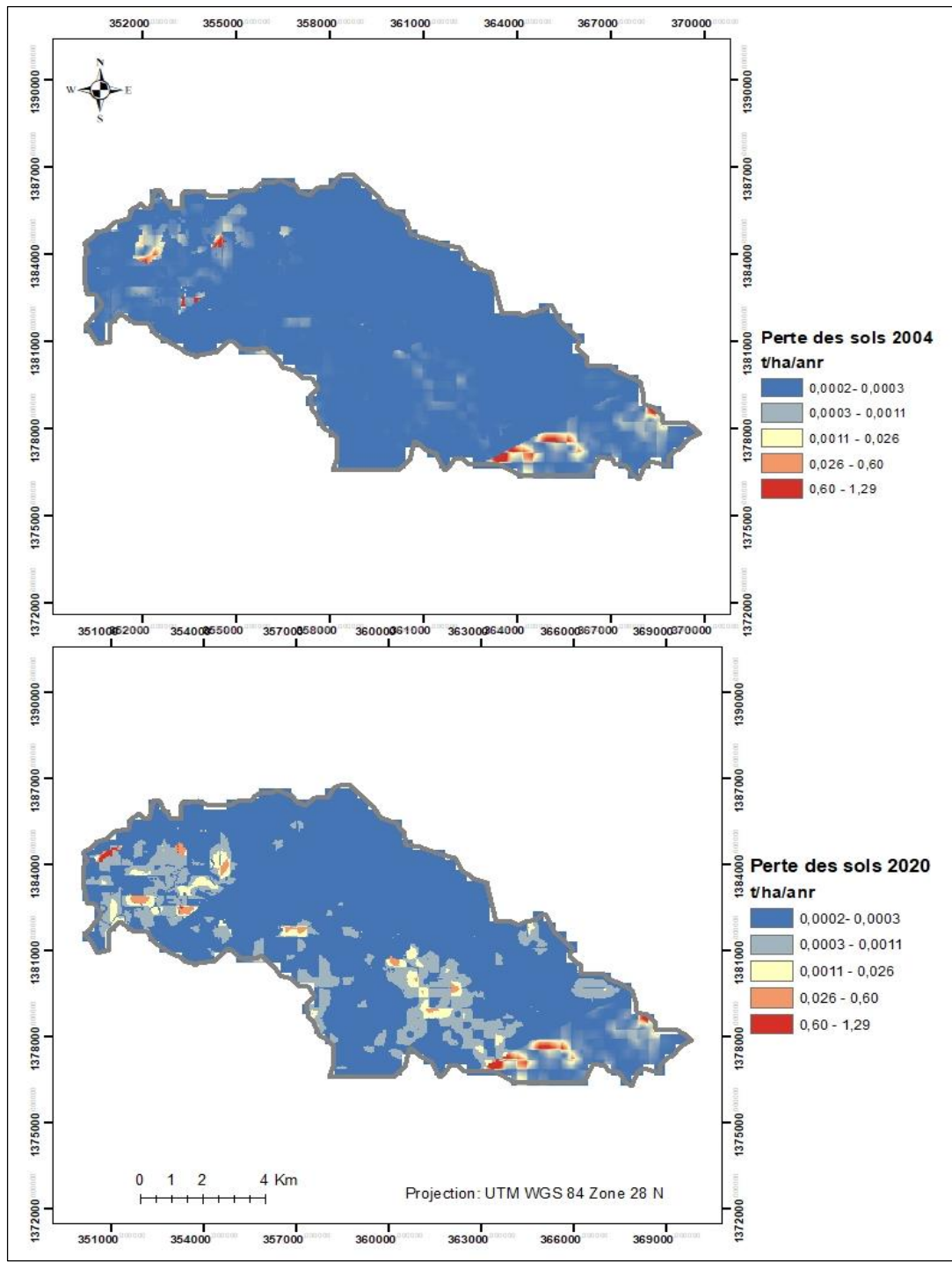
Dans le bassin versant de Djibonker, les surfaces très faiblement affectées par l'érosion hydrique couvraient une superficie de 9004,67 ha en 2004, soit 94 % de l'étendue du bassin, et 7599,51 ha en 2020 soit 79,81 % de la superficie totale du bassin. Elles sont localisées dans la partie nord-est et au centre du bassin. Cette partie est marquée par une couverture végétale importante comme indiqué par les résultats du facteur de couverture (C). L'intensité de l'érosion est ralentie dans ce cas par les plantes et les pentes relativement faibles. Des pertes en sols comprises entre 0,0004-0,0011 t/ha/an ont été estimées sur une superficie de 453,37 ha en 2004 et une superficie de 1553,10 ha en 2020, soit un bilan de 1009,73 ha (tableau 48). Les localités concernées par ces pertes en sols sont Brin, Bourofaye Baïnouck et Mpack (carte 43). Les pertes en sols estimées relativement importantes ont des valeurs de 0,60-1,29 t/ha/an. Elles s'étendent sur une superficie de 3,59 ha en 2004 et 11,33 ha en 2020 soit un bilan de 7,74 ha. Le taux de perte est légèrement en hausse entre 2000 et 2020, même si, par ailleurs, la moyenne de la perte en sols dans le bassin de Djibonker est relativement très faible (0,13 t/ha/an).

Dans le bassin d'Agnak, les pertes en sols évaluées très faibles sont estimées sur une superficie de 13246,38 ha en 2004 et une superficie de 12686,31 ha en 2020 soit respectivement 86,91 % et 83,24 % du territoire. Ces valeurs concernent la partie nord-est du bassin où l'on trouve les villages de Mawa, Laty et Agnak-Grand (carte 44). Des pertes de 0,0004 et 0,0015 t/ha/an ont été déterminées sur une superficie de 1450,51 ha et 1923,54 ha respectivement en 2004 et 2020. Au niveau de cette partie, est notée la présence relativement modérée de la couverture végétale C avec des coefficients compris entre 0,33-0,41 en 2004 et 0,29-0,37 en 2022 (carte 44). Les pertes maximales estimées sont comprises

entre 0,67 et 1,31t/ha/an et couvrent une superficie de 29,93 ha en 2004 et 39,29 ha en 2020 (tableau 49). Le taux de perte en sols moyen estimé dans le bassin d'Agnak est de 0,38t/ha/an, qui est, tolérante (>6,7 t/ha/an) selon la classification de la FAO.

Tableau 48 : Pertes de sols en 2004 et 2020 et leurs fluctuations à Djibonker

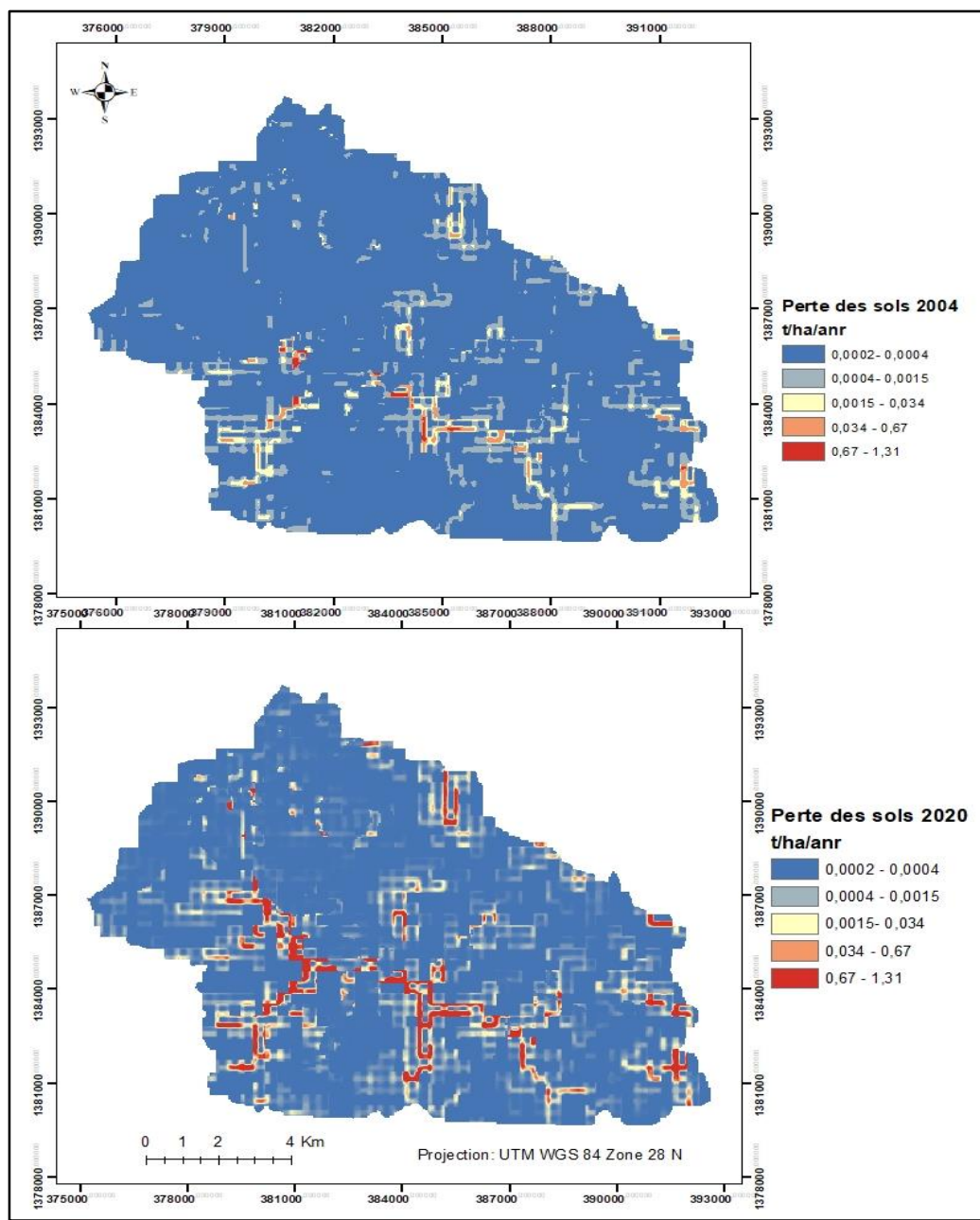
Pertes des sols (t/ha/an)	2004		2020		Bilan
	Ha	%	Ha	%	Ha
0,0002-0,0004	9004,67	94,54	7599,51	79,81	-1405,16
0,0004-0,0011	453,37	4,76	1553,10	16,31	1099,73
0,0011-0,026	55,22	0,58	277,33	2,91	222,11
0,026-0,60	7,53	0,08	80,83	0,85	73,3
0,60-1,29	3,59	0,04	11,33	0,12	7,74



Carte 43 : Distribution spatiale des pertes de sols à Djibonker de 2004 à 2020

Tableau 49 : Pertes de sols en 2004 et 2020 et leurs fluctuations à Agnak

Pertes des sols (t/ha/an)	2004		2020		Bilan
	Ha	%	Ha	%	Ha
0,0002- 0,0004	13246,38	86,91	12686,31	83,24	-560,07
0,0004- 0,0015	1450,51	9,52	1923,54	12,62	473,03
0,0015-0,034	373,71	2,45	451,72	2,96	78,01
0,034-0,67	141,15	0,93	139,25	0,91	-1,9
0,67-1,31	29,93	0,20	39,29	0,26	9,36



Carte 44 : Distribution spatiale des pertes de sols à Agnak de 2004 à 2020

La multiplication des activités agricoles en milieu subsaharien favorise une perte importante des composantes des sols. Les données tirées du traitement cartographique et d'enquêtes socio-économiques conduites auprès des populations indiquent quelques facteurs qui entraînent la dégradation des sols. Parmi les activités des communautés, nous avons les

techniques de restauration des terres développées par les populations, les activités extractives de sols pour la construction, l'aménagement des ouvrages agricoles, etc.

VIII.3. Facteurs de la perte des sols

Les fortes quantités de pluies, les demandes importantes de terres de cultures aux fins agricoles et l'usage de produits chimiques contribuent à la détérioration de la qualité des sols. Les informations tirées des enquêtes ont montré que les facteurs de risques de dégradation des sols sont dus au choix de la position des champs de cultures, au mode d'utilisation des sols et au temps de jachère.

VIII.3.1. La position des parcelles de culture, un facteur de la perte des sols

Le choix des champs de cultures est favorisé par les conditions hydro-climatiques actuelles qui sévissent en Basse-Casamance. En raison de la baisse de rendements rizicoles, les populations ont orienté leurs activités agricoles au niveau des plateaux et versants. Ainsi, la plupart des activités arboricoles sont développées au niveau de ces versants.

58,88 % des personnes interrogées cultivent au niveau des versants (fig.45) ; un nombre conséquent s'adonne à la culture de l'anacarde. Les plantations d'anacardiens ont connu une forte percée au début des années 1980 en Casamance. Cette monoculture ne favorisant pas le développement d'autres espèces végétales, entraîne l'élimination progressive des autres espèces végétales. Il faut noter que la valeur économique de cette spéculation suscite un intérêt fort chez les populations.

29,28 % des personnes s'investissent dans la riziculture et dans le maraîchage au niveau des bas-fonds (fig. 45). Cette zone du bassin, dépressionnaire, reçoit en principe plus d'eau et de particules fines sapées par l'eau de ruissellement. Toutefois, l'afflux d'exploitants agricoles autour des bas-fonds est motivé par le développement de la culture maraîchère. Les vallées devraient être moins affectées par la perte en sol, au contraire les formes d'aménagement individuel entraînent un risque d'érosion en période de forte pluie. La technique du « *zai* » est appliquée le plus par les populations interrogées. Cette technique est réapparue vers le début de la sécheresse des années 1980. Par souci de retenir l'eau en

permanence dans les parcelles, chaque exploitant s'organise de façon individuelle pour conserver sa parcelle humide.

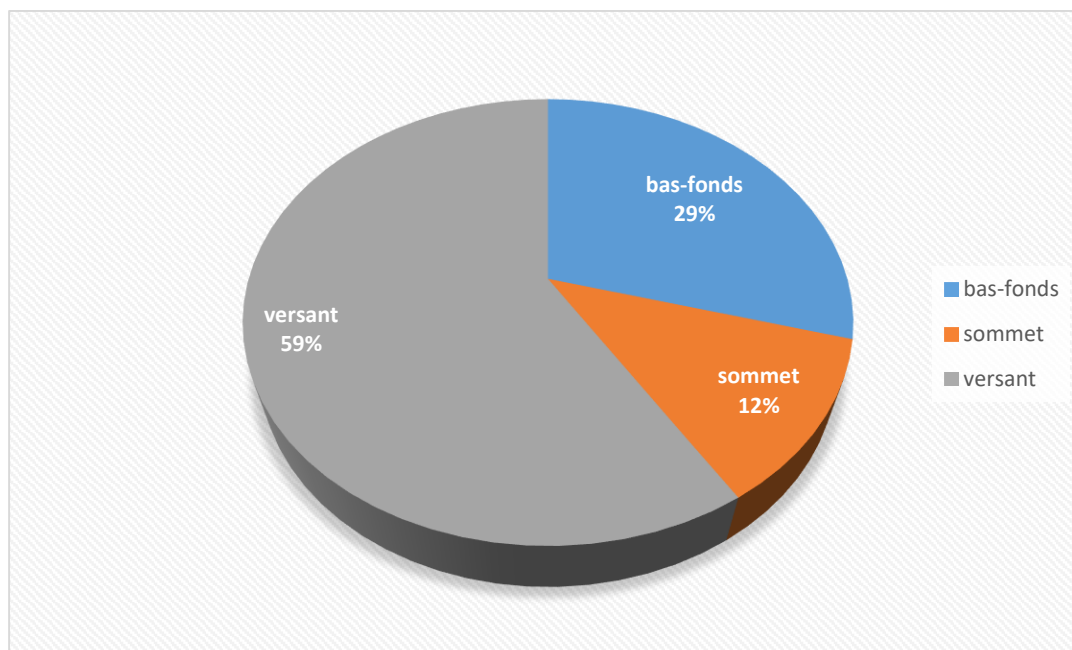


Figure 45 : Situation topographique des champs de cultures selon les personnes interrogées dans les bassins étudiés

VIII.3.2. Usages de sols et raccourcissement de la jachère, facteurs de la dégradation des terres

En dehors de l'occupation des sols à usage d'habitation, les populations s'investissent dans des pratiques agricoles intensives. Pour ce qui concerne le mode d'occupation des sols, les statistiques indiquent une évolution progressive des zones de cultures de plateau. Entre 2004 et 2020, les superficies sont passées de 2176,47 à 4568,25 ha à Agnak. Les superficies dédiées aux cultures de rente sont dominées par les plantations et/ou fermes agricoles, ce qui démontre la dynamique fulgurante de l'utilisation des terres à usage agricole dans la zone d'étude. Parmi les populations interrogées, 19,3 % effectuent la jachère dans leurs exploitations agricoles (fig.46). Ceux qui ne pratiquent pas la jachère (80,7 %) préfèrent associer ou faire une rotation des cultures à chaque saison agricole (fig.46). La faible ou non pratique de la rotation contribue non seulement à la détérioration de la fertilité des sols mais aussi à la dégradation du manteau des terres de culture. Selon le responsable de l'INP « les

populations ont pratiquement réduit voir abandonné l'amendement de leurs parcelles, qui jadis contribuait fortement à la fertilisation des sols ». En dehors de ces pratiques, les agriculteurs ont jugé utiles de se lancer dans le morcellement de leurs vallées qui, en l'occurrence, peut ne pas être favorable aux exploitants agricoles.

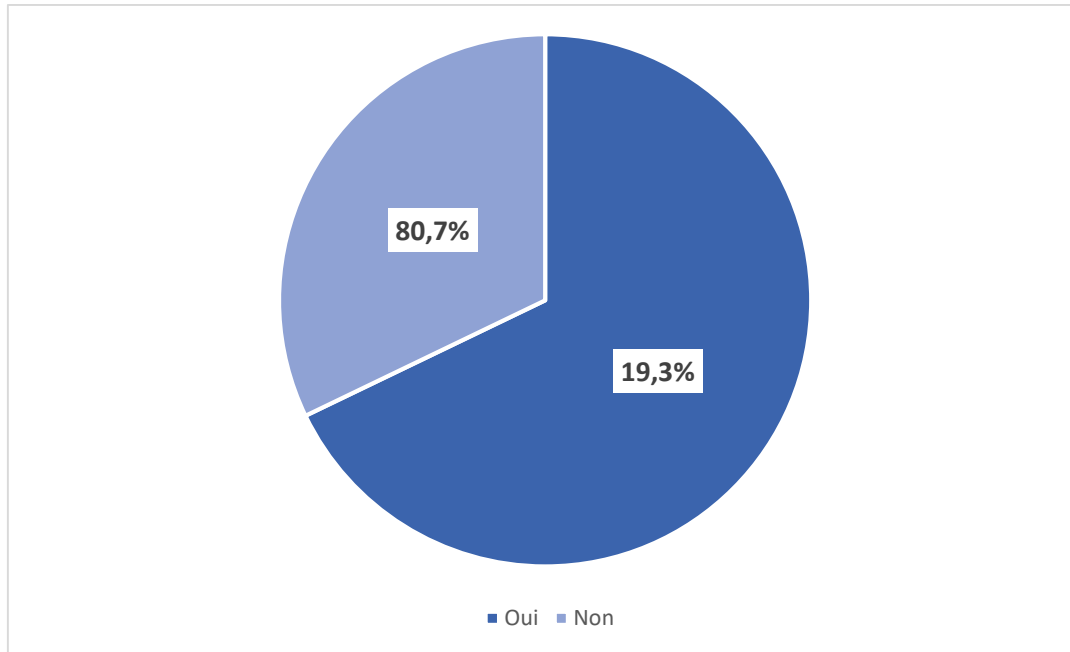


Figure 46 : Répondants pratiquant la jachère dans leurs champs de cultures

VIII.4. Initiatives antiérosives et modes de récupération des sols

Les habitudes agricoles des paysans tournés vers la monoculture (riz, arachide, etc.) contribuent à la détérioration de la qualité des sols en Casamance. De plus, les modes d'organisation des parcelles de cultures ne favorisent pas trop le développement des sols. Par ailleurs, des méthodes sont proposées par les communautés et les spécialistes pour limiter l'ampleur de la dégradation des sols.

VIII.4.1. Les initiatives antiérosives et orientations des services techniques

La dynamique évolutive de la dégradation des terres en Casamance ne laisse pas indifférent les services techniques. En effet, il est par conséquent du rôle des acteurs techniques de mobiliser des ressources financières et logistiques pour mieux faire face aux conséquences liées à dégradation des terres et à la perte des sols. Plusieurs méthodes de gestion sont

recommandées aujourd'hui aux agriculteurs ou exploitants agricoles dans la région pour une meilleure amélioration de la qualité des sols et une augmentation de la productivité des terres de cultures. Dans ces programmes, l'institut National de la Pédologie (INP) favorise la promotion des compostières, le renforcement de capacité ou la formation des exploitants agricoles à la production de compost, l'amendement agricole, la lutte contre la salinisation et le phosphatage. En dehors des formations, les techniques durables structurelles sont proposées, à savoir :

- ✓ la construction de diguettes encadrées contre l'ensablement des vallées ;
- ✓ le reboisement de vétiver (photo 10) ;
- ✓ le phosphate naturel ;
- ✓ l'utilisation du phosphogypse ;
- ✓ la construction de digues de retenue et de digues anti-sel.



Photo 10: Le vétiver « *Vetiveria nigriflora* » reboisé pour limiter l'érosion des sols dans la vallée de Mpack (octobre, 2021) .

VIII.4.2. Les techniques communautaires pour la gestion et la conservation des sols

Différentes méthodes ou techniques traditionnelles possibles sont proposées pour limiter l'érosion des terres, la dégradation des sols et l'acidification des terres agricoles et qui peuvent être à la portée des communautés. Les pratiques communautaires liées à la conservation et à la gestion des sols sont aujourd'hui liées à une détérioration accrue des sols dans la zone. Certaines pratiques communautaires sont initiées et pratiquées dans les

territoires des bassins de Djibonker et Agnak. Parmi celles-ci, nous avons la culture en billons, l'aménagement de digues traditionnelles de retenue, le reboisement, les bandes enherbées, etc.

Pour la culture en billons, les avantages de ce type de culture sont qu'au moment de la formation des billons, les matières organiques et les autres matériaux (tels les résidus de végétation, le fumier, etc.) sont concentrés dans et sous le billon de telle sorte que les plantes peuvent les utiliser complètement. Pour cette technique, il faut savoir qu'on y décèle des limites liées à la nature du sol et des spécificités topographiques du milieu et de la période de travail. Cette technique est développée par 44,2 % des personnes interrogées dans les deux bassins d'étude (Photo 11). Ces dernières jugent la technique adéquate vue qu'elle réduit au moins la perte de terre dans la parcelle.

L'aménagement de digues traditionnelles de retenue, des ouvrages embryonnaires sont installés au niveau des vallées de Binako et Camaracounda pour atténuer la vitesse de l'eau et retenir une partie des matériaux alluvionnaires sapés dans les parcelles. D'après les populations interrogées, ces digues avaient pour rôle, au départ, de freiner l'avancée du front salé dans les vallées. Par ailleurs, elles sont jugées efficaces par 35,2 % des personnes interrogées (fig. 47). Cette technique pourrait être plus pratique si les vallées identifiées dans la zone étaient remembrées. Le reboisement et les bandes enherbées ne sont pas trop connus des agriculteurs de la zone. D'ailleurs, 9,3 % et 7,8 % ont dit pratiquer respectivement ces techniques dans leurs parcelles.

A retenir que ces différentes techniques de gestion et de conservation de sols concourent à la réduction des pertes de sols au niveau des exploitations et parcelles agricoles visitées pendant cette étude. Toutefois, il semble difficile d'apprécier la durabilité et l'efficacité de ces opérations dans un contexte de changement climatique.

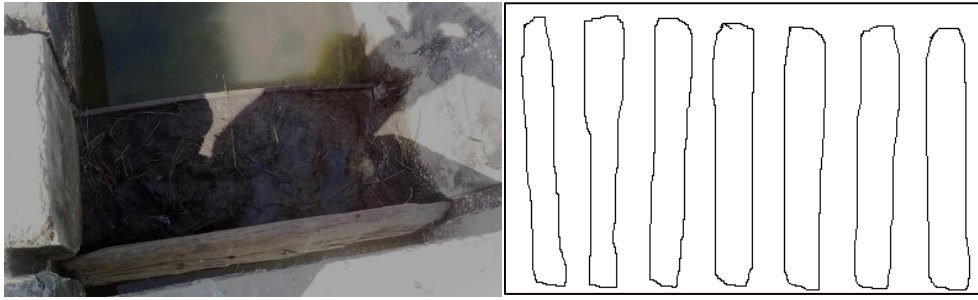


Photo 11 : Digue de retenue installée par la population à Binako (novembre, 2021) et technique de billonnage

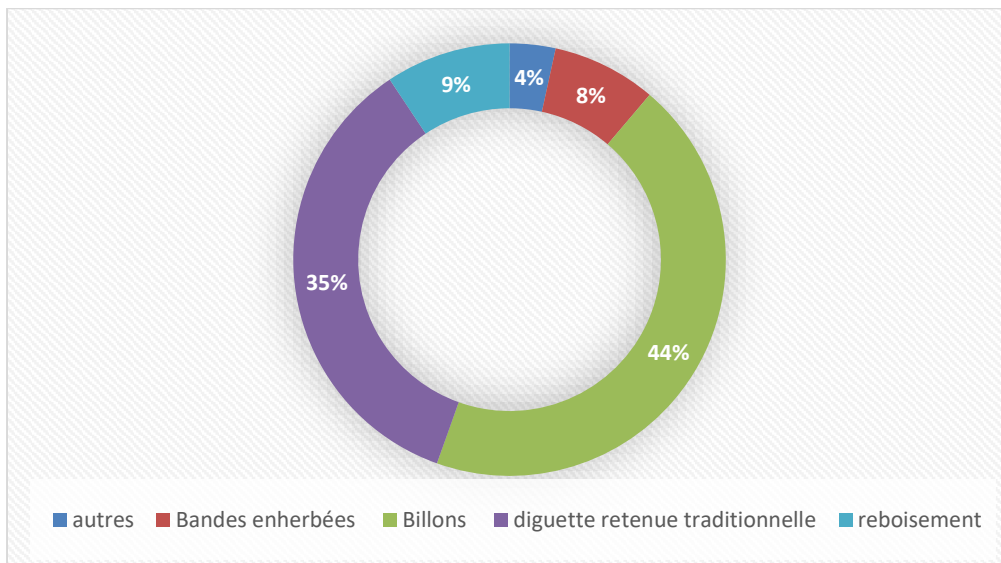


Figure 47 : Stratégies mises en œuvre pour lutter contre la perte des sols

Conclusion du chapitre VIII

L'évaluation de l'érosion hydrique des sols faite via le modèle USLE indique une sensibilité relativement faible aux pertes en sols dans les bassins étudiés. Les données d'occupation des sols, du modèle numérique de terrain, de la couverture végétale ont aidé à la détermination des cinq (5) facteurs du modèle appliqué. L'érodibilité des sols déterminés compris entre 0,014 et 0,02 indique que l'érosion hydrique est relativement faible. Le facteur de couverture (C) montre des coefficients de couverture végétale relativement importants et favorables au ralentissement de l'érosion hydrique. D'après les résultats des pertes en sols estimées, une augmentation des surfaces sensiblement affectées à l'érosion hydrique est notée entre 2004 et 2020 sur l'étendue des bassins étudiés. Les résultats démontrent qu'en

2004, 4,76 % de la superficie du bassin de Djibonker soit 453,37 ha sensiblement affectés par l'érosion hydrique. En 2020, une nette progression a été observée, sur ces taux évalués à 0,0002-0,0004 t/ha/an, 16,31 % soit 1553,10 ha. Les paramètres physiques appliqués dans le modèle USLE ne sont pas les seuls indicateurs des pertes en sols identifiés dans les bassins d'étude. Les pratiques agricoles observées à travers les enquêtes socio-économiques indiquent qu'une concentration des cultures sur les versants (58,88 %) et un raccourcissement voire une faible pratique de la jachère (19,3 %) ont été notés dans les sites visités. Or, des études ont démontré que sur ces sols ferrugineux tropicaux sableux, l'intensification des pratiques agricoles entraîne un déséquilibre des bilans minéraux et organiques. Ce déséquilibre est dû, selon Boli *et al.* (1993), aux pertes par érosion hydrique, à la non restitution par la biomasse et à la réduction de l'activité de la mésofaune. En réponse, des initiatives embryonnaires de réduction des pertes en sols (bandes enherbées, billons, digues traditionnelles de retenue et reboisement) sont développées par les communautés en vue de mieux conserver l'eau et les sols. Les orientations des services techniques, en cours dans certains sites visités, concourent à l'intégration des pratiques agricoles résilientes au changement climatique et à la conservation des sols au niveau de la parcelle. A l'échelle nationale, sur le plan structurel, une mise à l'échelle des initiatives ou solutions de gestion durable des terres, sur la moitié des superficies emblavées, à l'horizon 2035, est projetée. Cette stratégie pourrait renverser les tendances et minimiser la dégradation des terres (CSE, 2015). Avec ses pertes en sols liées en partie aux dynamiques environnementales il nécessaire d'évoquer les facteurs et les mutations observées dans les bassins versants étudiés.

CHAPITRE IX : MUTATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES, ENVIRONNEMENTALES ET DÉVELOPPEMENT DES ACTIVITÉS DANS LES TERRITOIRES DES BASSINS

Les territoires de la Casamance ont singulièrement été touchés par des crises de formes diverses. Parmi les plus prégnantes, nous avons le conflit armé et les sécheresses pluviométriques et hydrologiques exacerbées par la variabilité climatique. Avec 12 % d'abandons de villages dans la région de Ziguinchor, 30.000 à 50.000 personnes déplacées en 20 ans de conflit et 159 victimes de mines au cours de l'année 1997 (Robin, 2006 ; Mendy, 2017). Dans cette zone, l'économie rurale dépendante de l'agriculture pluviale a singulièrement régressé au profit d'activités compensatoires, en l'occurrence le commerce, la pêche et autres secteurs. Selon les estimations du PADERCA, il y aurait 130.000 ha de superficies abandonnées à cause de la salinisation et de l'acidité des terres entre 1970 et 1986 (PADERCA, 2008 ; Mendy (2017). Les défis semblent énormes d'autant plus que l'agriculture mobilise le plus important nombre d'actifs en Afrique subsaharienne. Plus de 55% de la population rurale tirent l'essentiel de leurs ressources des activités agricoles (Ecowap, 2014). De surcroît, avec le recul de la riziculture sous pluie, les populations ont su adopter de nouvelles filières agricoles orientées le plus vers la culture de contre saison et l'arboriculture fruitière. Dans toutes les régions du monde, avec ou sans appui extérieur, les agriculteurs innovent, testent de nouvelles pratiques, font évoluer leurs activités pour tirer profit de leur environnement ou s'adapter à ses évolutions (Bentz *et al.*, 2002 ; Ouédraogo, 2012).

Quelles stratégies de résilience communautaire face aux mutations globales autour des vallées des bassins versants d'étude ? Ce chapitre est axé autour de l'évaluation des pratiques d'adaptation développées par les populations locales pour bonifier ou diversifier leurs sources de revenus et des approches de gestion de l'eau.

IX.1. Méthodologie utilisée pour la collecte et traitement des données

Pour bien mener cette étude, divers outils ont été utilisés pour faciliter l'analyse des résultats. Il s'agit du Strengths, Weaknesses, Opportunities et Threats (SWOT) et de la méthode d'enquête boule de neige.

IX.1.1. L'Outil SWOT, pour une analyse multicritère

Sa simplicité et sa facilité de manœuvre donne plus de schémas stratégiques d'évaluation des interventions, des objectifs et des schémas d'analyse des acteurs. Pour son application, le diagnostic se fait en quatre dimensions : forces et faiblesse ; opportunités et menaces. Dans les deux premières dimensions, les éléments sont intrinsèques aux acteurs. Par contre, dans la seconde dimension, il s'agit de facteurs externes dont les acteurs ne peuvent mesurer l'étendue. Elle aide à bien comprendre les stratégies externes comme internes des facteurs de mutations et des conséquences sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'activité.

Les analyses induites par cette démarche méthodologique sont axées sur l'approche initiative interne des acteurs en faveur de l'environnement et des activités socioéconomiques des populations. L'outil SWOT prend en compte chaque influence des personnes impliquées aux questions des mutations autour des vallées.

IX.1.2. Méthodes d'enquêtes auprès des exploitants agricoles

Une enquête socioéconomique a été réalisée dans les villages de Toubacouta, Bourofaye Bainouck, Mpack et Camaracounda. L'unité de référence de notre enquête est l'exploitant agricole. Nous les avons interviewés en pleine activité maraîchère au niveau des vallées. Une méthode d'enquête semi-aléatoire a été adoptée. Celle-ci consiste à interroger le maximum d'exploitants agricoles rencontrés pendant le déroulement de nos enquêtes.

Dans l'ensemble, 120 exploitants agricoles dont 100 migrants et 20 autochtones ont répondu à nos questions. Pour comprendre les raisons de ces mutations, les questions étaient plus orientées sur les zones de provenance, l'activité de départ, la superficie exploitée et les revenus par campagne.

IX.2. Les facteurs des mutations

Les mutations autour des vallées de Mpack et Camaracounda émanent en partie des facteurs socio-physiques et politiques.

IX.2.1. Une pluviométrie à tendance irrégulière

Les perceptions des populations ont été recueillies pour déterminer la tendance de la pluviométrie dans les localités étudiées de manière globale. Les réponses reçues indiquent une variabilité de la pluviométrie comme facteurs des mutations environnementales et socioéconomiques observées dans les villages enquêtés. 14,57 % des populations interrogées trouvent que la pluviométrie a baissé comparée aux années précédentes. Elle arrive de manière tardive 5,96 % et d'une intensité forte, selon 18,21 % des populations interrogées (fig.48). Les activités agricoles sont au ralenti et le calendrier agricole complétement modifié chez une bonne partie d'exploitants agricoles. Certains évoquent, le retrait précoce, comme facteur de pertes de récoltes et baisse de leurs rendements agricoles. Cette perception est donnée par 8,28 % des populations rencontrées. Le raccourcissement des jours de pluies comme facteurs destructeurs de récoltes est évoqué par 24,17% des populations (fig.48). Ces perceptions sur les indicateurs de la variabilité pluviométrique ont entraîné globalement les changements actuels des pratiques agricoles dans la zone d'étude.

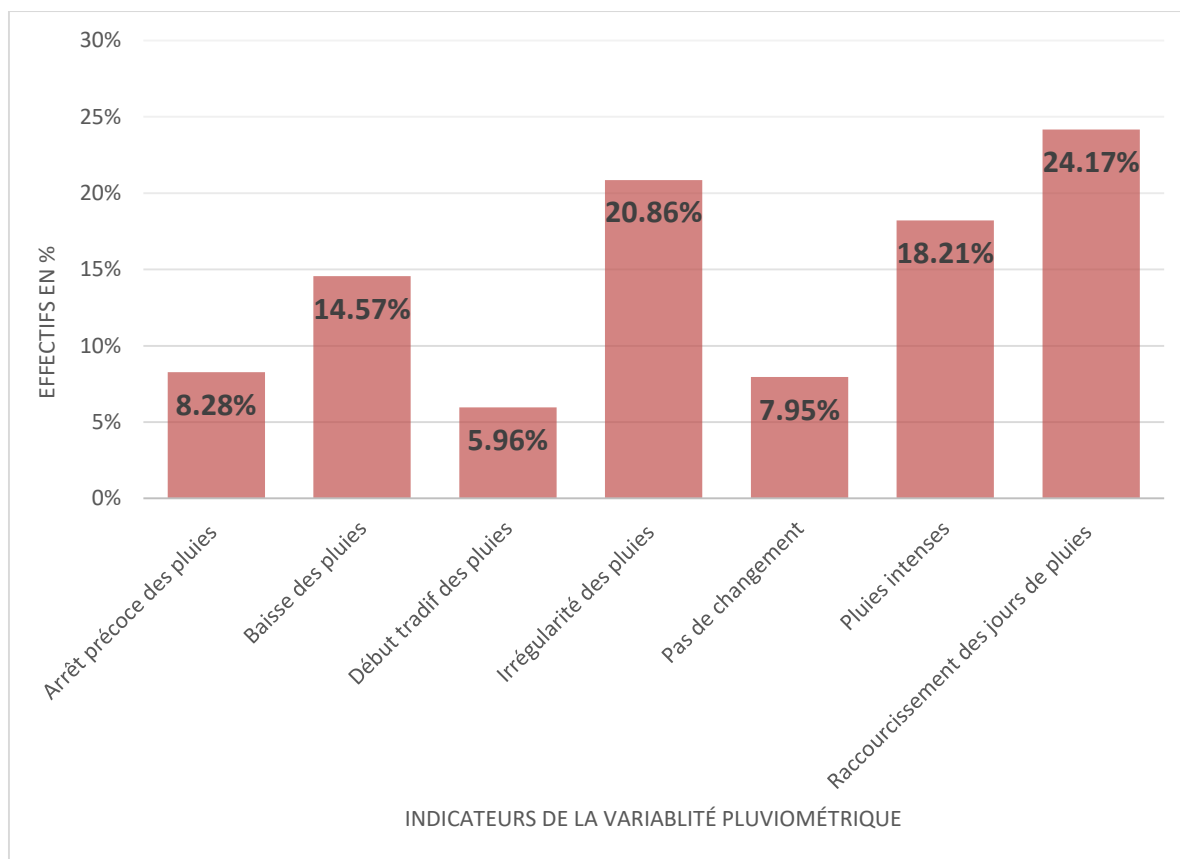


Figure 48: La perception de la population sur la tendance de la pluviométrie

IX.2.2. De la crise de l'agriculture pluviale

Les paysages de Basse-Casamance se caractérisent par une opposition fondamentale entre deux types d'unités géomorphologiques complémentaires : le domaine des terres basses inondables des bassins fluviaux parcourus par un réseau complexe de marigots, et qui se trouve périodiquement recouvert par l'eau de mer, et le domaine des bas plateaux du Continental Terminal où la forêt est remplacée, par endroits, par les cultures d'arachide, de mil, de maïs et d'arbres fruitiers (Sané, 2017). Le système agraire, Diola, en particulier, était plus tourné vers les cultures pluviales. En effet, les populations ont élaboré de véritables techniques d'aménagements, de dessalement et de labour pour la culture du riz. Ce qui explique l'importance de la riziculture dans les systèmes de production des Diolas, (Diémé, 2006). La culture du riz était l'émanation de toute la communauté car les retombées peuvent assurer la subsistance des familles pour au moins une longue période de l'année. Cela a valu

la réorientation des politiques agricoles vers une stratégie de mise en valeur des vallées de Casamance.

L'état du Sénégal a toujours compté sur la riziculture de type pluvial et des potentialités naturelles de la Casamance pour relever le déficit en riz du pays (Ntab, 2013). Par contre, depuis la sécheresse des années 1970 ayant de fait entraîné une récession économique et la baisse drastique des rendements des agriculteurs et la réduction des superficies emblavées, les attentes ont au moins diminué.

Ces cultures, dépendantes des précipitations qui ont fortement régressé depuis plusieurs décennies, poussent les paysans vers la promotion de nouveaux types de spéculations agricoles.

IX.2.3. Une zone au contexte socio-politique complexe

Le mouvement indépendantiste de Casamance qui a vu le jour au début des années 1980 a entraîné l'effondrement de l'économie de la région. Il a occasionné beaucoup de dégâts humains et économiques avec, entre autres, une paralysie presque totale de tous les secteurs de développement (Bassène, 2016). Cette crise politique a favorisé en grande partie une recomposition des pratiques agricoles auprès d'une frange de la population, majoritairement rurale. Dans la partie sud-ouest du pays, où le paysan casamançais inféodé à sa culture dépendante de l'agriculture sous pluie sent ses efforts inhibés par la crise politique. Les cultures de plateau dominantes à savoir, l'arachide et le mil, qui occupaient essentiellement les terres de champs de brousse, sont abandonnées par les paysans du fait de l'instabilité dans la zone. Le déplacement des populations d'une localité à une autre, d'une zone de conflit à une zone plus stable, a entraîné un abandon des richesses générées sur le territoire d'origine mais a aussi transformé ces populations en réfugiés, manquant de repères sociaux et culturels (Bassène, 2016).

Dans la commune de Nyassia où le conflit a entraîné un déplacement de groupes de personnes vers la ville de Ziguinchor, une importante perte a été observée. Les populations habituées à collecter des produits forestiers pour la consommation et la vente, ont eu un accès limité à cause des risques de tomber sur des mines. Le retour des populations

déplacées et l'arrivée de migrants ont suscité une diversité de pratiques agricoles dans la zone.

L'idée d'une nouvelle campagne agricole n'empêche pas les migrants à prendre le risque de venir ou d'envahir une zone à situation politico-militaire incertaine.

IX.3. Les mutations observées

Les mutations observées dans l'environnement de Camaracounda et Mpack sont diverses. Parmi celles-ci, nous avons la mobilité agricole, les mutations de l'occupation des sols et la faible coordination des acteurs identifiés.

IX.3.1. La migration agricole, moteur de développement de la culture de contre saison

La recherche d'une situation économique plus favorable et de sources de revenus constitue l'une des premières variables influençant actuellement les décisions de mobilités et de migration, qu'elles soient prises par un individu ou par une communauté (OCDE, 2008 ; OIM, 2009 ; Hathie *et al.*, 2015).

Dans la vallée de Mpack, le maraîchage est devenu un facteur de reconversion des jeunes et des femmes. En provenance d'horizons divers, des jeunes s'investissent dans cette vallée à la recherche de revenus supplémentaires. Ils ont favorisé le développement du maraîchage dans la zone. La présence de ces jeunes a donné un intérêt particulier à la mise en valeur des vallées en saison sèche jadis négligée. L'engouement pour ces cultures se justifie par le fait qu'elles garantissent des revenus réguliers aux exploitants agricoles.

Parmi les exploitants agricoles interrogés dans la vallée de Mpack, 65 % sont des migrants. Depuis plus de 5 ans, ils s'intéressent à l'activité et y gagnent en moyenne 600.000 FCFA en une campagne agricole (fig. 49). Un exploitant agricole, migrant a partagé son expérience dans cette vallée depuis son arrivée :

Encadré 1.

Dramé, originaire de Jaafar/région de Sédhiou

« J'étudiai au village (Jaafar/Bémé-Bidjini), avant d'aller poursuivre mes études à Dakar, trois ans après j'ai dû arrêter pour situation familiale compliquée. J'ai décidé de venir à Bourofaye Bainouck en 2016, d'aider ma famille. Après ma première campagne (2017), j'ai payé les frais du voyage de mon frère jumeau, qui actuellement est en Espagne. Les revenus obtenus durant les campagnes de 2018 et 2019, ont permis de couvrir les frais de voyage de mon jeune frère, parti il y'a 4 mois en Espagne.

Actuellement, j'ai épargné plus de 1 million dans mon compte bancaire. Mon objectif, assurer le prix de mon voyage pour les rejoindre, d'ici 2 ans. Je vous dis, que je gagne plus de

En six mois d'activités agricoles, les revenus obtenus couvrent en partie les besoins familiaux des migrants et les permettent de planifier de nouveaux projets.

De plus, les résultats des enquêtes révèlent que ceux qui s'activent autour de cette culture n'ont souvent pas une expérience ou ne bénéficient pas d'une formation en horticulture ou technique agricole. En effet, la motivation autour de l'activité réside sur le fait que ces jeunes et femmes, en majorité, ne visent que sur l'importance de leurs rendements.

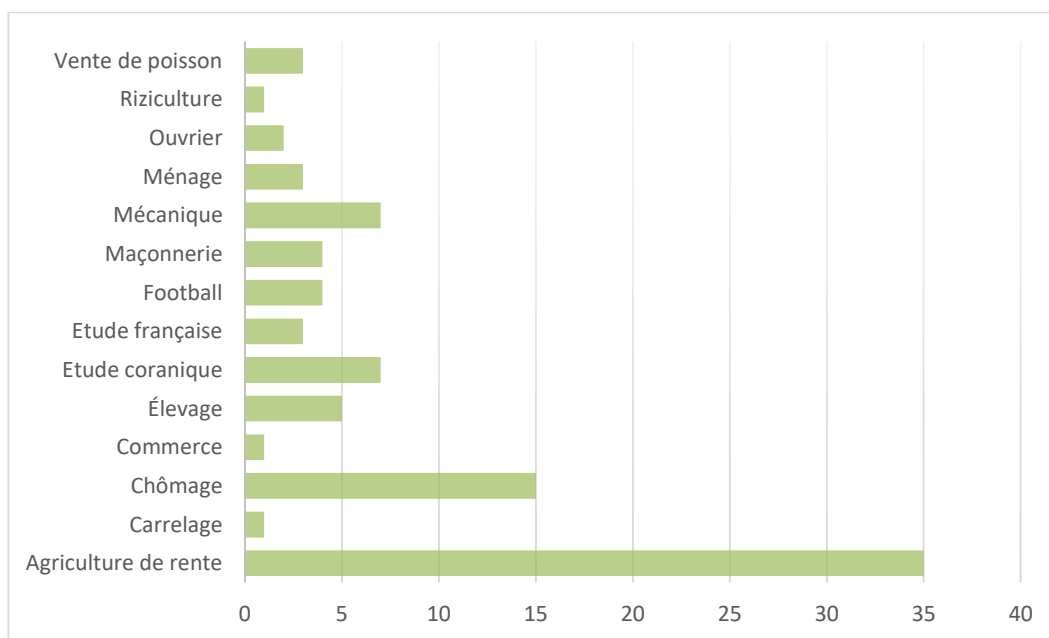


Figure 49: Profils de départ des exploitants agricoles migrants

Parmi les jeunes interrogés sur place, 45 % avaient une occupation différente de l'activité maraîchère (fig.49). Ceux qui s'intéressent à l'activité agricole, dans leurs localités de provenance, représentent 35 % des migrants interrogés. Ils sont majoritairement originaires des régions de Kolda, Sédhiou et de la Gambie. Les migrants se déplacent selon un projet migratoire individuel, avec le profil fréquent de jeune chef de ménage à la recherche des moyens de subsistance pour tout le groupe familial (Ghisalberti, 2011).

La situation prometteuse de cette activité agricole continue de mobiliser plus de jeunes autour de cette vallée.

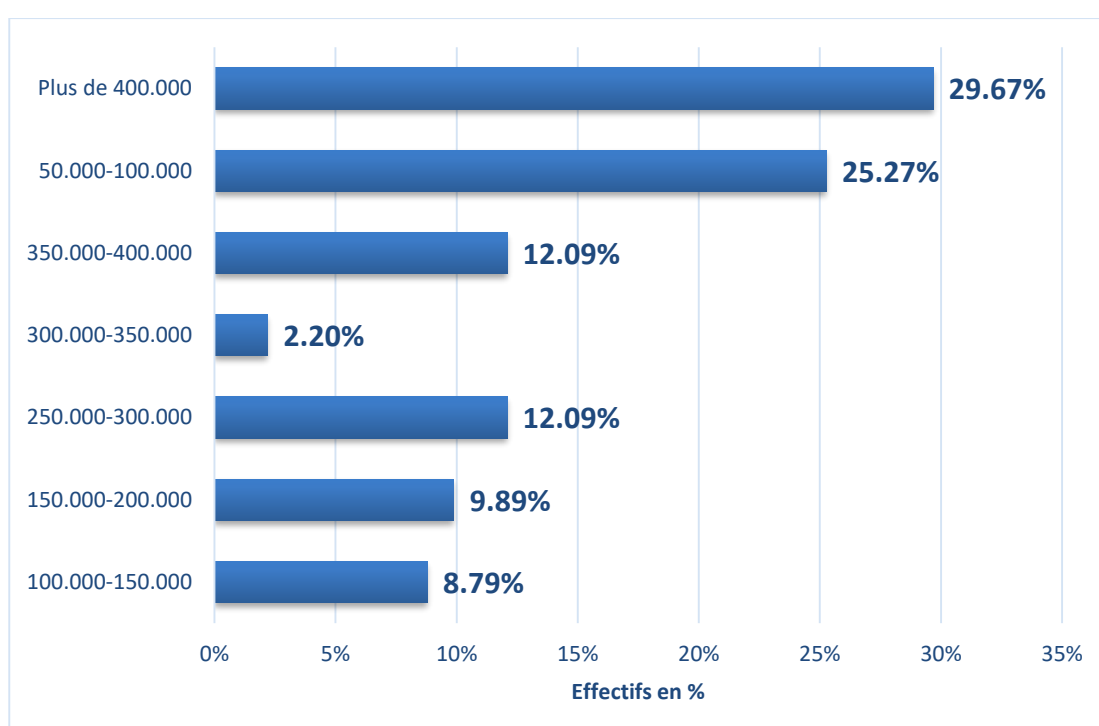


Figure 50 : Revenus saisonniers des exploitants agricoles interrogés

Les exploitants interrogés ont, en moyenne, des revenus compris entre 50.000-400000 FCFA pendant une campagne agricole (fig.50). L'effectif le plus important des migrants rencontrés gagnent plus 400.000Fcfa après une campagne agricole dans ces vallées. Le maraîchage pratiqué dans cette vallée est devenu un moyen de subsistance des communautés.

IX.3.2. Pratiques et techniques adaptatives en gestion de l'eau dans les vallées

IX.3.2.1. Une méthode empirique de gestion de l'eau et de la conservation des sols

La maîtrise de l'eau pour une agriculture productive et durable est la stratégie de première importance sur laquelle les exploitants agricoles et leurs décideurs souhaitent conjuguer leurs efforts. Étant également la ressource essentielle pour le développement de la production des exploitants agricoles, sa gestion permet de maintenir la production agricole, d'augmenter les rendements et créer d'autres activités connexes ou secondaires. Le caractère difficile et aléatoire de la riziculture en Basse-Casamance a favorisé l'adoption de nouvelles pratiques agricoles résilientes et des techniques de gestion de l'eau. L'irrigation est considérée comme le meilleur moyen d'augmenter la production agricole tout en réduisant sa vulnérabilité à la variation climatique (Rosegrant et Cline, 2003 ; Diouf, 2008 ; Cils, 2010 ; Barbier *et al.*, 2011). De petits périmètres irrigués individuels sont aménagés par chaque exploitant agricole.

Pour une bonne organisation agricole, à l'intérieur des parcelles, les exploitants agricoles creusent des puisards pour assurer l'arrosage de leurs cultures. Des systèmes de maîtrise de l'eau individuels sont pratiqués par chaque détenteur d'exploitation. Des billons sont faits pour délimiter les parcelles, pour optimiser la rétention d'eau dans la parcelle et les planches pour aligner horizontalement les cultures. Autour des vallées, chaque exploitant développe une stratégie de gestion et de conservation de l'eau pour mieux développer sa culture. Elle repose majoritairement sur 3 systèmes : le *zai* manuel, le billonnage et la culture sur planchette (fig. 51).

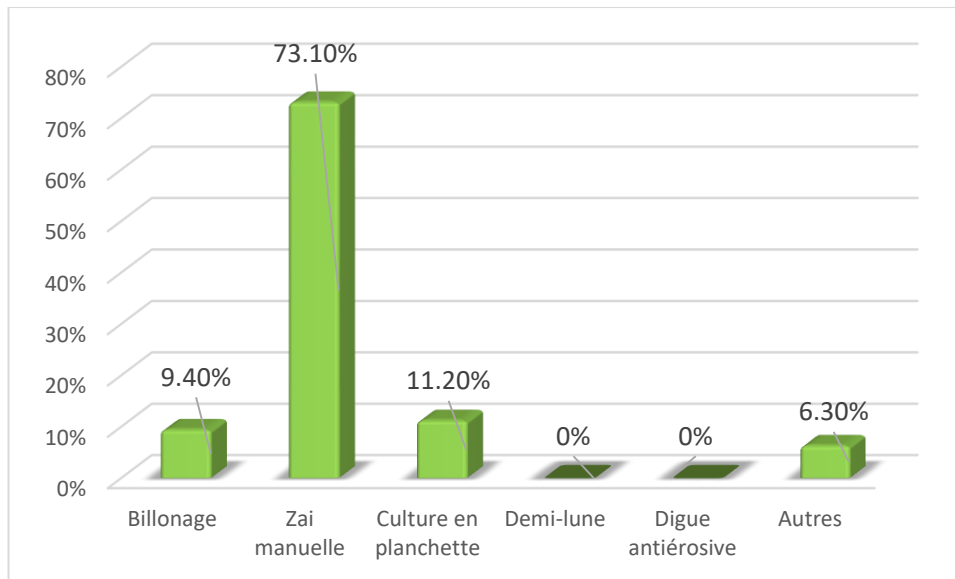


Figure 51 : Perception de la population sur les techniques de conservation des eaux et des sols dans les vallées étudiées

Les exploitants ont développé des stratégies pour minimiser les risques d'érosion, de dégradation des sols et des ressources en eau. Par les pratiques de conservation de l'eau identifiées, le *zai* manuel est majoritairement développé par 73,10 % des exploitants agricoles. Ces parcelles au *zai* sont localisées au pied de talus où la pente est plus raide. Face aux enjeux liés à la récupération des terres dégradées, à l'amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol, à l'augmentation des rendements et des surfaces cultivées, les exploitants optent pour une organisation empirique de leurs parcelles agricoles. Certains exploitants agricoles interrogés organisent leurs parcelles en forme de planchettes (11,20 %). D'autres, pour optimiser le drainage efficace de l'eau, pratiquent le billonnage (9,40 %) à plusieurs sens dans la parcelle (fig. 51). En illustration, sur la photo 12, un exploitant agricole entrain d'injecter des produits sur ses plantes et une parcelle organisée en système de *zai* manuel.

Le manque de renforcement des capacités techniques des organisations paysannes, en systèmes de gestion collectifs de l'eau et en usage d'intrants constitue un frein à la valorisation des productions des exploitants agricoles.

A

B



Photo 12 : Disposition des trous en *zai* manuel sur une parcelle d'aubergine (A) et (B) exploitant agricole utilisant les pesticides sur les plants d'aubergine (avril, 2021)

IX.3.2.2. Une diversité de cultures développées

La richesse de ces vallées a favorisé le développement de la production maraîchère fortement prisée dans la zone de Mpack et Camaracounda. Des périmètres maraîchers s'étendent sur une vallée de plus 1300 ha segmentée par des ouvrages de type 1 de régulation des eaux de pluies. Au moment du déroulement des enquêtes, 10 types de spéculations ont été identifiés autour de parcelles exploitées. Dans le tableau 50, sont représentées quelques spéculations exploitées par les exploitants.

Tableau 50 : Quelques spéculations cultivées au niveau des vallées de Mpack et Camaracounda

Spéculation	Superficie (m ²)	Quantité (kg)	Fréquence
Poivron	7265	18918	21,3 %
Piment	1270	1550	5,2 %
Tomate	16330	28020	61,6 %
Pastèque	4650	11500	8,1 %
Aubergine	1150	1640	3,8 %
Total	-	-	100 %

Les spéculations comme la tomate (61,06 %) et le poivron (21,3 %) sont plus cultivés par les exploitants agricoles (tableau 50). Elles sont considérées comme plus rentables,

malgré leur demande en eau importante. Au-delà de celles listées, les exploitants cultivent d'autres spéculations comme le piment, le gombo, l'aubergine et la pastèque. Sur la photo 13, on aperçoit des *banabana* Bissau-guinéens venus acheter des tomates dans la vallée de Mpack.



Photo 13 : Récolte de tomate et vente de légumes dans des parcelles agricoles dans la vallée de Mpack (avril, 2021)

IX.3.3.3. Le rôle des acteurs, quelles approches pour une résilience économique, sociale et environnementale autour des territoires

Au-delà des aléas liés aux perturbations climatiques, les activités humaines ont contribué à la dégradation des services écologiques et de la qualité de l'environnement. Actuellement, on tend vers une réorganisation ou une redynamisation des systèmes de production fortement touchés par les événements climatiques récents. Par conséquent, les communautés fortement touchées par ces aléas se mettent à l'idée d'attendre d'éventuels appuis externes et de soutien venant de l'autorité territoriale, administrative et centrale. Toutefois, il est bien de reconnaître l'écart qui existe entre les politiques et les initiatives agricoles communautaires. Les exploitants agricoles arrivent à peine à construire des actions collectives durables pour le développement de leurs territoires. Les politiques d'accompagnement et d'encadrement ont été initiées par l'État dans le cadre de la relance des activités agricoles en Casamance. Cependant, ces politiques n'ont pas réussi à porter totalement le secteur au niveau souhaité, à savoir l'organisation, l'encadrement et

l'autonomisation des acteurs locaux. Également, la plupart des actions mises en œuvre au niveau communautaire sont vouées à l'échec. Cela est dû en grande partie au manque d'harmonisation des interventions, d'inclusion des acteurs et de pérennisation des différents projets de développement mis en œuvre à l'échelle des territoires.

L'analyse du rôle des acteurs permet de comprendre les positions diverses de chaque chaîne dans la prise en compte des actions de résilience communautaire. La problématique de l'agriculture concerne toutes les parties prenantes, d'où l'intérêt d'initier des schémas inclusifs.

La figure 52 fait la synthèse des différents acteurs qui s'intéressent aux territoires étudiés pour une meilleure compréhension des facteurs de mutations environnementales et socioéconomiques. Il s'agit des acteurs suivants, classés en fonction de leurs champs d'intérêts :

- les communautés : il s'agit des acteurs constitués de la population autochtone, des migrants et des commerçants qui s'investissent directement autour des vallées ;
- les collectivités territoriales, qui elles, préfèrent prendre ou développer des projets socioéconomiques et environnementaux ;
- l'État qui pense à la priorisation des projets à dimension environnementale, économique et sociale ;
- les organismes et organes de développement qui pensent à trouver de nouvelles pistes d'intervention afin de mieux élargir leurs champs ou zones d'intérêts.

Autour des vallées de Camaracounda et de Mpack, les populations ont une aptitude à gérer la ressource en eau et organisent traditionnellement leurs parcelles.

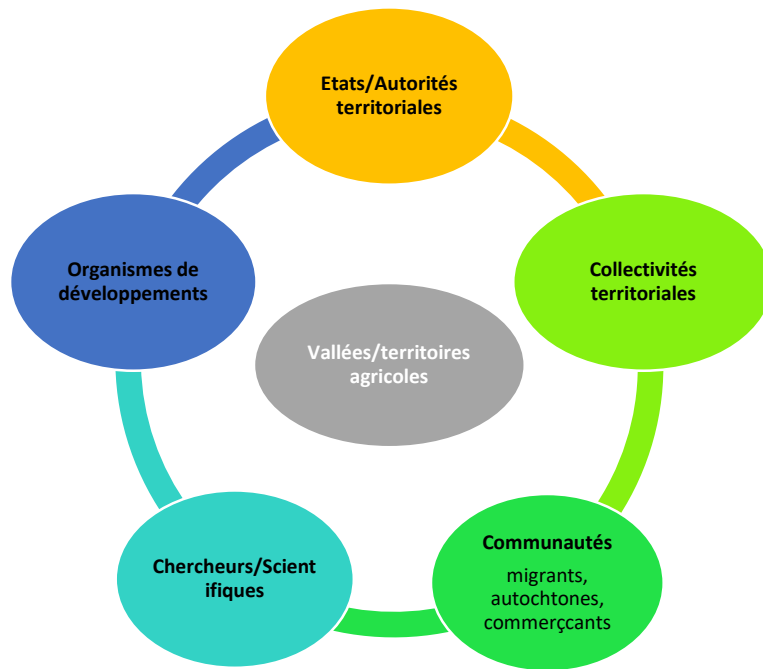


Figure 52 : Schéma des acteurs potentiels intervenants autour des vallées

IX.3.3.4. De l'analyse multicritère de la relation entre acteurs

L'analyse des relations entre acteurs est nécessaire pour une synergie future des actions conduites autour des vallées. A cet effet, l'identification des opportunités et goulots internes comme externes permet de mieux améliorer la situation des acteurs qui interviennent dans la gestion des vallées et ceux qui développent des activités autour des vallées.

A travers les enquêtes conduites auprès des exploitants agricoles, divers défis sont ressortis :

- faible coordination multipartite entre les acteurs ;
- absence d'un cadre formel ;
- faible ancrage communautaire des aménagements de type 1 ;
- pratiques agricoles diverses à fort usage de produits chimiques.

A partir de l'outil SWOT, plusieurs forces et faiblesses ressortent se basant sur des opportunités autour des vallées. Il s'agit, d'une part, des forces intrinsèques comme extrinsèques aux acteurs et/ou exploitants agricoles.

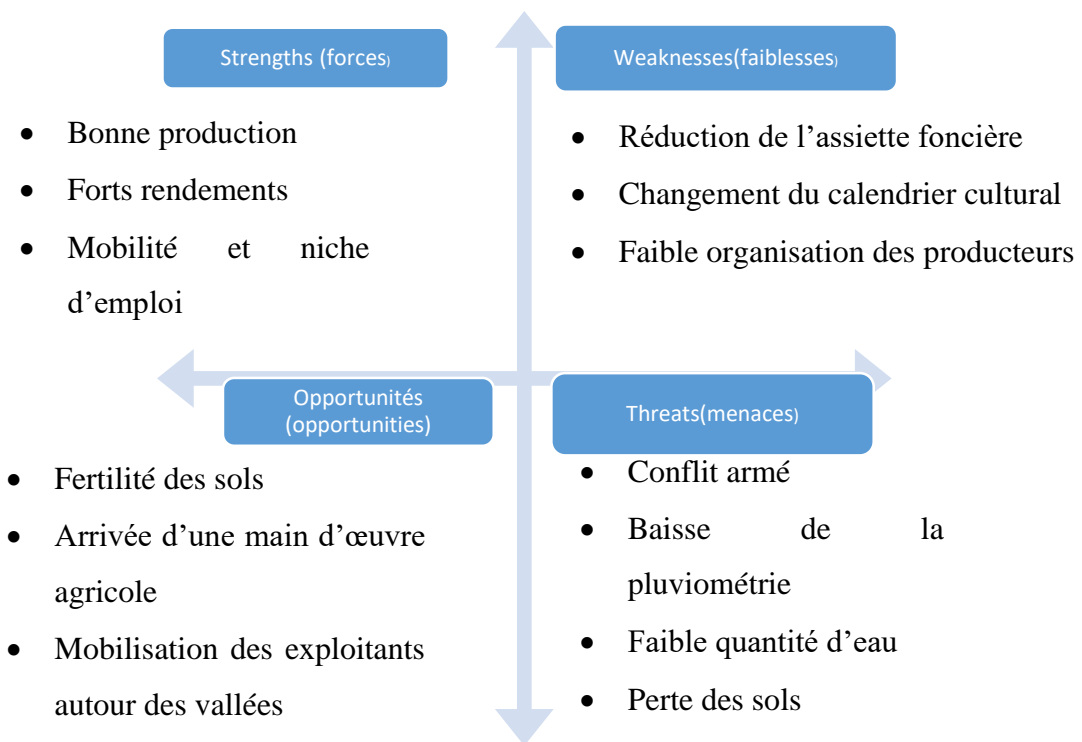


Figure 53 : Forces et contraintes de l'agriculture autour des territoires des bassins étudiés

Les résultats de l'analyse SWOT montrent qu'autour des vallées, les exploitants agricoles et les populations génèrent beaucoup de ressources financières (forces) et entraînent une mobilité importante de différents acteurs. Les communautés développent des stratégies de gestion communautaire au moyen de techniques rudimentaires ou traditionnelles pour continuer leurs activités agricoles.

IX.4. Pratiques communautaires pour une gestion de l'eau, une technique efficace de développement des activités agricoles

L'eau de la vallée de Mpack est très importante pour le bon déroulement des activités de production agricole. La riziculture et le maraîchage regroupent pratiquement toutes les femmes autour de cette vallée, d'où la priorisation de la gestion des ouvrages de régulation des eaux, surtout celle de pluie stockée par ces infrastructures. Aujourd'hui, ces ouvrages participent pleinement au développement de l'activité agricole dans la zone. Très attractive, la vallée de Mpack reçoit des populations des quartiers périphériques de la ville de Ziguinchor (Kénia, Kandialang et Nema 2). Dans les rizières de Toubacouta et Bourofaye-

Bainouck, se converge une masse de femmes maraîchères pour y organiser leurs activités agricoles.

IX.4.1. De la naissance des comités locaux de vallées

Il existe une coordination de 8 villages qui exploitent la vallée de Mpack (Bouhouye, Bofa-Bayotte, Mpack, Toubacouta, Bourofaye-Diola, Bourofaye-Bainouck, Katouré, Djibélor, Baraf). Des ouvrages de rétention des eaux de pluies sont aménagés par le Projet Pôle de Développement de la Casamance (PPDC) dans le cadre de la revalorisation des vallées de la Casamance et la relance de la riziculture de bas-fonds. A cet effet, un dispositif de gestion contrôlé par des vannes d'ouverture et de fermeture a été mis en place pour une gestion efficiente de l'eau de la vallée. Les vannes sont ouvertes au mois de juin, et cela est appliqué par le gestionnaire de chaque village. A l'intérieur de chaque village, existe un comité local chargé d'assurer la coordination et le respect des principes du grand comité. Il peut arriver à ce que les populations formulent une demande auprès du comité pour qu'elles puissent ouvrir les vannes pour leurs activités agricoles. Ce mode de gestion des vallées a amélioré l'état des rizières de Bofa et Bouhouye, situées en amont de l'ouvrage. Toutefois, l'approche n'est pas totalement adoptée par les communautés qui partagent la vallée selon le gestionnaire de l'ouvrage en amont de Toubacouta.

Encadré 2.

« L'année passée (2020), les habitants de Toubacouta avaient voulu ouvrir les vannes pour que l'eau puisse envahir leurs rizières. Cela a suscité une petite tension entre les membres du comité et ces derniers. Il a fallu l'intervention des chefs de villages concernés et de leaders coutumiers pour apaiser la tension » témoigne Yaya Bodian, gestionnaire des trois ouvrages de Mpack, en même temps, secrétaire du comité de gestion inter-villageois de la vallée de Mpack.

Le Schéma adopté dans la vallée de Mpack (fig. 54) peut être élargi dans plusieurs vallées de Basse-Casamance. La gestion de l'eau par bassin versant doit être schématisée dans les politiques d'amélioration des conditions d'accès des acteurs dans la gestion de l'eau. Il s'agit

d'établir et de maintenir des rôles clairs avec les communautés et d'élargir et approfondir les rôles des organismes de bassins dans la promotion de l'hydro-diplomatie comme moyen de favoriser la coopération et de prévenir les conflits. Un principe qui semble être appliqué dans la vallée de Mpack où la gestion des ouvrages implique plusieurs acteurs.

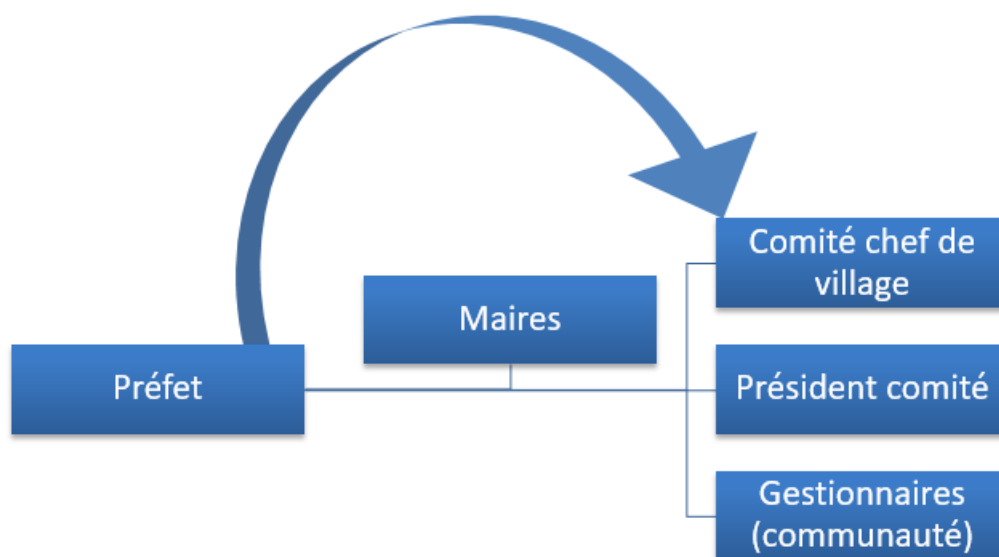


Figure 54: Mode de fonctionnement des comités locaux de vallée

IX.4.2. Les défis liés à la coordination entre acteurs communautaires

Les besoins de l'Afrique en matière d'appui technique et de ressources financières pour le secteur de l'eau sont énormes, notamment pour la mise en valeur et la gestion des eaux de surfaces et de celles souterraines partagées (Unesco, 2021). Les fortes demandes en eau des communautés rurales pour les usages agricoles engendrent des problèmes auprès des acteurs. Cette multiplicité des usages, des acteurs et des demandes font naître des défis en matière de collaboration, d'échanges et de partage d'une ressource communautaire. Il semble plus facile chez un occupant des bassins de délimiter sa parcelle, sa vallée ou son terroir que de matérialiser les limites naturelles du bassin versant.

Enfin, les enquêtes menées auprès des populations ont montré quelques défis à relever dans la gestion collégiale de l'eau dans les bassins.

Dans les bassins de Djibonker et Agnak, pendant le déroulement des enquêtes de terrain, les acteurs rencontrés ont partagé certaines contraintes qu'ils rencontrent pendant les activités agricoles (fig. 55). Il s'agit de la faible compréhension de l'importance de la coordination autour de l'eau (97 répondants soit 30,22 %) ; de l'ignorance de la notion de bassin versant (53 répondants soit 16,51 %) ; de l'absence de collectif managérial local (35 répondants soit 10,90 %) et de l'ignorance du potentiel de l'eau (28 répondants soit 8,72 %). Ces défis mentionnés par les populations indiquent à quel niveau les activités socio-économiques prennent le dessus sur la mise en place de cadres ou de structures faîtières autour de la gestion de l'eau dans les bassins. Vu cette léthargie des acteurs, des problèmes ont commencé à émerger dans les territoires enquêtés.

Une réalité existe dans la partie aval du marigot d'Agnak en amont du village de Tourécounda où des conflits semblent être récurrents selon les populations interrogées. Nous avons pu constater à quel point la situation est préoccupante. « *Cette rivalité est née, d'une part dans l'accès au foncier à usage agricole (arboriculture) et d'autre part, la gestion de l'eau dans la vallée (saison des pluies)* », témoigne un habitant de Laty. « *Les populations en retour ont affecté pour la plupart d'entre eux, des terres à leurs tuteurs et/ou parents venus de la Guinée-Bissau. Ces derniers (allochtones) ont commencé à aménager de vastes vergers d'anacardiens sur des terres qui jadis appartiennent aux habitants déplacés dont certains commencent à revenir dans leurs terroirs* ».

Selon Browner (1996), les facteurs de succès de la gestion intégrée de l'eau dans un bassin versant sont l'institutionnalisation du bassin versant comme élément central des efforts de gestion, l'adoption d'une approche participative, une place importante des connaissances scientifiques et à l'utilisation de données fiables, la création de plan de communication efficace et l'élaboration d'un programme de formation et de sensibilisation (Robert, 2011). Le renforcement de capacités des acteurs à des échelles différentes du territoire doit être une priorité pour mieux résorber les problèmes liés à la gestion communautaire de l'eau dans les bassins fluviaux, d'autant plus que la majorité de la population de ces bassins dépendent directement des activités inhérentes à l'eau. De ce fait,

la maîtrise de l'eau et sa distribution ne peut que favoriser le développement des activités et améliorer les conditions socioéconomiques des communautés paysannes.

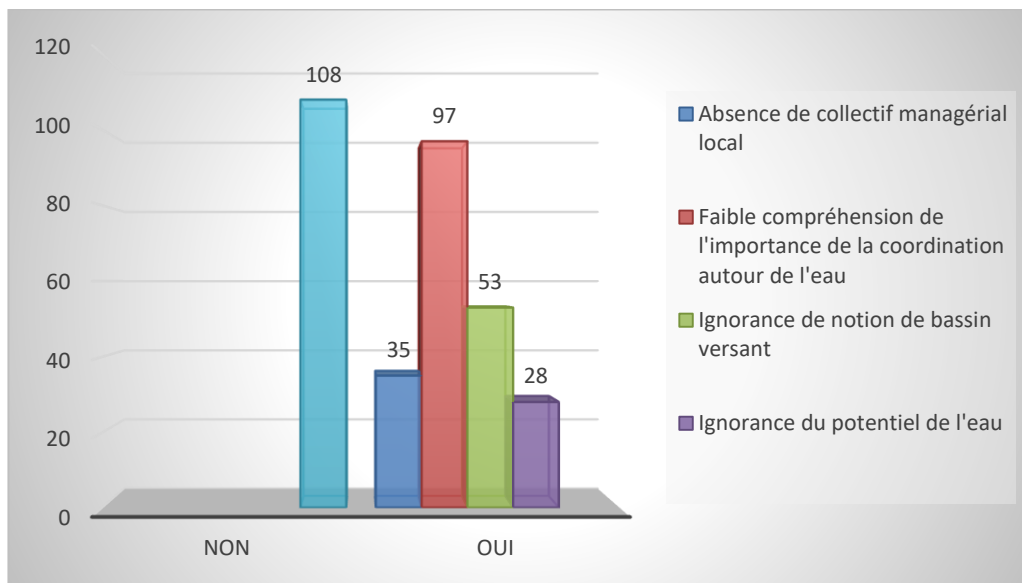


Figure 55 : Problèmes autour de la gestion de l'eau dans les bassins d'étude

Conclusion du chapitre IX

Les recompositions environnementales et l'émergence des activités productives autour des vallées de Mpack et Camaracounda sont liées aux aléas climatiques, au contexte politique et à l'arrivée de nouveaux exploitants agricoles. La récente variabilité pluviométrique n'a toujours pas connu son épilogue. On constate une recrudescence de pluies tardives et le retrait précoce de pluviométrie entraînant le changement des calendriers agricoles des paysans. Elle a occasionné le déclin de la monoculture arachidière et la faible mobilisation de paysans autour de la riziculture de bas-fonds, très dépendante des apports pluviométriques. L'analyse montre également que le conflit en Casamance a plus poussé les populations à quitter leurs terroirs d'origine vers les villes voisines (Ziguinchor, Bignona) et la sous-région Gambie et Guinée Bissau. Avec le retour de la paix, les populations se sont lancées depuis 2004 dans l'agriculture de contre saison et l'arboriculture pour redresser l'économie locale.

L'agriculture familiale est en train de connaître un déclin dans la vallée de Mpack. Au début, les agriculteurs ne pensaient qu'à remplir leur grenier et combler leur déficit en riz. Actuellement, l'arrivée des migrants a donné un autre visage avec des exploitations agricoles de plus en plus importantes en saison sèche. Celles-ci assurent non seulement une santé économique des agriculteurs, mais apportent à leurs propriétaires des gains importants en période de soudure. Aujourd'hui, les politiques publiques agricoles gagneraient à mieux encadrer les orientations agricoles actuelles des populations afin de les rendre plus attractives et compétitives ; ce qui participerait à la diversification des sources de revenus des populations (Bâ, 2019). Ainsi, il faudra penser également à une meilleure gestion de l'eau en vue de favoriser le développement des activités agricoles autour des territoires. De par l'approche bassin versant, considéré comme l'échelle de référence pour une meilleure coordination des eaux (GWP-INBO, 2009), en amont et en aval, des actions doivent être développées pour définir des modalités d'usages transparentes. Toutefois, des règles de gestion souples doivent être mises en place en vue d'assurer la cohérence entre différentes façons d'utiliser la ressource et assurer la coordination entre des objectifs pouvant être divergents.

Conclusion de la troisième partie

Cette partie a permis d'analyser la dynamique des états de surface du sol et de faire la cartographie de l'érosion hydrique dans les bassins étudiés. L'occupation des sols est dominée par une progression des cultures de plateau sur toute l'étendue des bassins versants, avec une stabilité et quelque part une faible régression de la végétation entre 2004 et 2020. Ces mutations autour des zones de cultures de plateau et des rizières, particulièrement en saison sèche sont favorisées par l'arrivée d'exploitants agricoles et une tendance irrégulière de la pluviométrie.

L'analyse a montré que cette forte dynamique autour des terres agricoles de bas-fonds a des conséquences hydrologiques comme l'érosion hydrique des sols déterminé par le modèle USLE.

Cette dynamique a suscité la mise en place d'initiatives pour une conservation des sols et de l'eau. Autour des ouvrages de rétention des eaux de pluies, sont mis en place des comités villageois, faiblement outillés, chargés de la gestion des ouvrages et de la gestion communautaire de l'eau. Par conséquent, quelques tensions et conflits ont été identifiés autour des vallées rizicoles, qui pouvaient être évités, si les acteurs étaient mieux structurés.

Devant ces initiatives de résilientes socio-économiques et environnementales ponctuelles, doivent naître des politiques de vulgarisations de bonnes pratiques agricoles et de gestion de l'eau en vue de mieux pousser les acteurs à la mise en place de structures faitières.

Conclusion générale

Les préoccupations scientifiques abordées dans cette étude ont été pratiquement prises en compte. Il s'agit de la détermination des caractéristiques morphométriques, de l'évaluation du potentiel en eau des bassins versants en rapport avec les dynamiques des territoires, de l'analyse des mutations environnementales et socioéconomiques qui découlent du fonctionnement hydrologique. Les derniers éléments abordés sont l'identification des acteurs, des approches et des initiatives et contraintes de gestion de l'eau au niveau des bassins versants non jaugés de Djibonker et d'Agnak. La thèse défendue est que la variabilité hydroclimatique actuelle et les pratiques sociétales déterminent le fonctionnement hydrosédimentaire des marigots des bassins versants de Djibonker et d'Agnak. Les réponses ont été apportées différemment dans les différentes parties de ce travail de thèse.

L'analyse des variables morphométriques a montré un relief monotone dont les altitudes ne dépassent pas les 35 m. Il est apparu que cette faiblesse des pentes participe intrinsèquement à la régulation des écoulements et aux mutations des unités morphopédologiques dans les bassins étudiés. Cette évolution des éléments physiographiques concerne également les formations végétales. Les territoires des bassins d'Agnak et de Djibonker ont connu une dynamique régressive de la couverture végétale entre 1988 et 2019. Durant cette période, il a été observé des activités chlorophylliennes faibles, surtout entre 2000 et 2019.

Les formations géologiques du bassin sédimentaire de la Casamance remontent à la transgression du Nouakchottien. Durant cet épisode, les différentes formations superficielles ont connu le jour, jusqu'à la formation actuelle des rivières du sud et de leurs *bolongs* respectifs.

Il faut également noter que les territoires des bassins versants étudiés ont connu une situation socio-économique contrastée en raison du contexte climatique et politico-militaire. Aujourd'hui, après le retour dans leurs villages d'origine, les populations s'investissent dans l'agriculture familiale par le développement de l'arboriculture, du maraîchage et de la

riziculture de bas-fonds. Globalement, les activités identifiées et développées par les communautés paysannes sont tributaires voire inhérentes à l'eau. Il s'agit, entre autres, de l'agriculture (91,6 %), du commerce (3,1 %) et de la pêche (2,8 %).

Au fond, les conditions hydroclimatiques de la Basse-Casamance ne semblent pas être les meilleures aujourd'hui. L'analyse des pluies et des températures, sur une période de 69 ans, a montré une variabilité importante. Des démarrages tardifs et des pluies d'intensité fortes à faibles impactent sur les activités socio-économiques des exploitations agricoles. La diminution des volumes d'eau précipitée a commencé à se faire sentir à la fin des années 1960. Des tendances à la hausse des températures ont été observées, précisément à l'échelle mensuelle au courant de la période 1960-2019. En Basse-Casamance, cette variabilité climatique n'est pas sans conséquence sur les ressources eau, en particulier les eaux de surface.

L'évaluation des eaux de surface par gravimétrie effectuée à l'aide des données GRACE a montré une variabilité spatio-temporelle du stockage d'eau sur l'ensemble des sites considérés. L'analyse faite à l'échelle mensuelle montre qu'il existe une importante variabilité des stockages d'eau qui a des conséquences sur le comportement hydrologique des bassins versants étudiés.

Les risques d'inondations et le potentiel des ressources en eau ont été déterminés dans ce travail. Le risque d'inondation est relativement élevé puisqu'on note que 45,5 ha et 48,26 des superficies respectives des bassins de Djibonker et d'Agnak ne sont pas à l'abri d'une éventuelle crue en cas de pluie torrentielle.

Les bassins possèdent également des potentialités en eau souterraine. Les indices du potentiel en eau les plus élevés couvrent 4 % et 3,50 % des bassins-versants de Djibonker et d'Agnak.

La modélisation du ruissellement par le modèle HEC-HMS dans les bassins versants étudiés indique une évolution des débits et des coefficients de ruissellement entre 2004 et 2020. Dans les deux sites, les débits sont passés de 120,3 à 388,4 m³/s et 48,6 à 231,9 m³/s

respectivement dans les bassins-versants d'Agnak et Djibonker. Cette évolution est sanctionnée par une hausse considérable des coefficients de ruissellement à la même période. Ces modifications du cycle hydrologique sont un fait révélateur des mutations des états de surfaces des sols dans la zone.

Ces fluctuations du cycle hydrologique entraînent également des dynamiques de matériaux fluviaux, à savoir des sédiments fins dans les différents compartiments des bassins-versants. Le suivi *in situ* des MES a indiqué des concentrations de sédiments, de diamètres hétérogènes dans le cours des marigots de Djibonker et d'Agnak. Ces flux et distribution de MES sont dictés par les conditions climatiques.

La progression des unités d'occupation des sols s'est faite de manière considérable. On dénote des terres de cultures de plateau, des rizières et de la végétation de terre ferme, qui sont dominantes dans les bassins d'étude. Une progression importante est enregistrée par les cultures de plateau entre 2004 et 2020 en raison du développement des activités arboricoles. Cette dynamique actuelle de l'agriculture impacte le processus hydrologique et le ruissellement des eaux dans les bassins versants.

La modélisation par USLE indique des pertes en sols sur l'étendue des bassins-versants. Entre 2004 et 2020, le taux moyen d'érosion de 0,67-1,31t/ha/an a progressé de 29,93 ha à 39,29 ha dans le bassin d'Agnak. Pour atténuer les pertes, des initiatives antiérosives et de conservation des sols ont été proposées par les acteurs et les communautés paysannes. Ces techniques, traditionnelles pour la plupart, réduisent l'intensité de l'eau et le transport des particules à l'échelle de la parcelle agricole.

A l'échelle des terroirs villageois, à l'instar du village de Darsalam, entre 1968 et 2004, les superficies des « cultures de plateau » ont évolué de manière progressive. Elles sont passées de 28,3 ha à 215,8 ha soit une augmentation de 187,3 ha. Une situation similaire est notée dans le village de Camaracounda où les zones dédiées aux cultures de plateau ont augmenté au détriment de la végétation de la terre ferme. Les mutations se sont opérées le plus dans les rizières qui, jadis, étaient faiblement exploitées en 2004. Actuellement, elles sont fortement mises en valeur pour des fins d'agriculture maraîchère hors saison de pluies.

Cette émergence des activités agricoles dans les vallées a donné naissance à de petits comités inter-villageois, en charge de la gestion des ouvrages aménagés par le PPDC dans la vallée partagée de Mpack.

Au terme de cette étude, on note que le fonctionnement hydrologique a entraîné des mutations environnementales et socio-économiques dans les bassins-versants étudiés. Cette étude a été faite sur la base de l'analyse géospatiale et des observations *in situ*. Les études hydrologiques sont aujourd'hui facilitées par l'usage des SIG dans la compréhension du fonctionnement des bassins-versants. Pour combler les lacunes de données observées, des suivis *in situ* couplés aux données d'imagerie spatiale ont été effectués à l'échelle journalière, mensuelle et interannuelle.

Cette thèse a contribué à une meilleure connaissance du fonctionnement hydrosédimentaire des bassins versants non jaugés. De par l'étude des dynamiques des états de surfaces, de l'analyse des flux sédimentaire et de l'évaluation des pertes en sols liés en partie par les mutations agricoles observées. Ces approches méthodologiques basées sur des enquêtes de terrain et des analyses spatiales (SIG et modélisation) nous ont aidé à obtenir des résultats indiqués dans les différents chapitres de cette thèse.

Au regard des résultats obtenus, il est bien de renforcer le suivi hydro-sédimentaire des bassins versants. Cela commence par la mise en place de moyens de prévision et de gestion de l'eau et des terres à l'échelle du bassin versant. Les territoires de l'eau sont dans une dynamique évolutive et les besoins des communautés en termes d'usage d'eau et de terres s'accroissent au fil du temps. A partir de ces préoccupations, il sera question de renforcer les compétences des communautés à la connaissance, à l'utilisation des outils et techniques adaptés aux réalités actuelles relatives au changement climatique pour une gestion communautaire de l'eau dans les bassins versants ruraux.

Cette thèse a des limites du fait que les données hydrométriques ne sont pas disponibles et pouvait aider à mener une étude hydrologique plus exhaustive. L'application d'un modèle conceptuel comme SWAT pouvait donner une meilleure appréhension des

événements de crues à l'échelle des bassins versants étudiés par les débits simulés associés aux débits observés.

En perspectives, un suivi mensuel des matières en suspension à l'échelle des sous-bassins versants non jaugés de la Casamance et des pertes en sols peut aider à comprendre davantage le fonctionnement hydrologique en Casamance. Ces recherches futures, permettront également de caractériser les matières en suspension et les variables hydrologiques par des mesures in situ et par télédétection. La mise en relation des variables morphométriques et des apports sédimentaires sera approfondie en vue d'examiner au mieux les dynamiques environnementales dans le Bassin sur une échelle temporelle bien établie. Il y va de même d'une conduite d'analyses microbiologiques en vue de ressortir les relations entre les aléas hydrologiques dans les eaux de surfaces et souterraines et les pratiques socioéconomiques des communautés. La relation entre les échanges d'eau dans le continuum eau-sol-plantes-atmosphère dans le bassin-versant de la Casamance fait partie également des pistes de recherches futures.

Références bibliographiques

1. Albergel. J. et Dacosta. H., 1996. Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal, actes de Conférence de Paris, n°238, PDF, pages.139-156.
2. Albergel J., Brunet D., Dubee G., Marieu B., Montoroi J.P., Pepin Y., Zante P., 1991. Projet pilote "Casamance" bas-fond de Djiguinoum, Rapport de synthèse hydrologique et hydrogéologique, Programme CEE-DG, XII n° TS2A-0216-M (CD), 42 pages.
3. Amat J.P., Dorize L., Le Cœur C., 2003. Éléments de géographie physique 2^{ème} éditions. Bréal, Dijon Quetigny, 464 pages.
4. Ambroise, B., 1998. Génèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1 - Processus et facteurs. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 11(4), pages. 471–496. <https://doi.org/10.7202/705317ar>.
5. Ardoin-B. S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau, Université Montpellier II, France, 441 pages.
6. Astite S.W., Medjerab A., El Wartiti M., El Mahmoudi N., 2015. Evaluation des caractéristiques physiques des bassins versants urbanisés par l'utilisation des systèmes d'informations géographiques et des modèles hydrologiques : cas des bassins versant de l'Oued Koriche (Nord Centre de l'Algérie), ARGISO, pages-63-66.
7. Atchadé A. A. G., 2014. Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin-versant de la rivière zou dans le Bénin méridional, Thèse de Doctorat, EDP/FLASH, 235pages.
8. Azzout Y., Barraud S. Cres F., Alfakih E., 1994. Techniques alternatives en assainissement pluvial ; choix, conception, réalisation et entretien. Technique et documentation, Paris, 372 pages.
9. Bâ B. D., 2019. Dynamiques spatio-temporelles des paysages et développement dans le département de Bignona (Basse Casamance septentrionale, Sénégal), thèse de doctorat, Université Assane de Seck de Ziguinchor, 314 pages.

10. Baba-Hamed K. et Bouanan. A., 2016. Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres par lissage pluvial, choix, conception, réalisation et entretiens par), *Geo-Eco-Trop.*, 40, 4, pages. 277-286.
11. Ballouche A., et Taibi A.N., 2014. Eau, milieux et aménagement, une recherche au service des territoires, Presses universitaires d'Angers, 331 pages.
12. Barbier B, Ouédraogo H, Dembélé Y, Yacouba H, Barry B, Jain JY, 2011. L'agriculture irriguée dans le Sahel ouest africain. *Cah, Agric* 20:2433. doi:10.1684/agr.2011.0475 pages.
13. Barnaud G, Fustec E., 2007. Conserver les zones humides : pourquoi ? Comment ? Éditions Quae, 295 pages.
14. Bassel. M., 1996. Pluies, ruissellement, pollution et évacuation des eaux. Contribution à l'étude des problèmes liés aux eaux dans la région de Dakar, Thèse de 3^{ème} cycle, Faculté des Lettres et Sciences Humaines UCAD, 1996, 254 pages.
15. Bemmo, U. et Chocat, B., 1993. Choix des modèles de pluies adaptées à la conception des réseaux d'assainissement pluvial urbain en zone tropical humide de Yaoundé. *Bulletin du CIEH*, 99, pages. 13-28.
16. Benabdesselam.T et Hammar.Y., 2009. Estimation de la réponse hydrologique d'un bassin versant urbanisé, *journal européen de recherche scientifique*, 2009, pages. 334-348.
17. Bennani O., 2020. Modélisation hydraulique et vulnérabilité territoriale aux inondations en milieu montagneux semi-aride. Cas des bassins versants de l'Ourika et la Rheraya (Maroc), Sciences, Techniques et Ingénierie, Hydrologie, Université Cadi Ayyad Semlalia-Marrakech, 162 pages.
18. Berni C., 2011. Processus de mobilisation et de transport de sédiments dans la zone de déferlement, thèse de doctorat, Université de Grenoble, Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), 250 pages.
19. Berthier.E, Andrieu. H, Fasquel. M, Creutin. J.D., 2001. Formation de débits dans les réseaux urbains d'évacuation des eaux pluviales : le rôle du sol, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2001, pages. 79-92.

20. Bienvenu E. O., 2019. Pratiques culturelles et sensibilité des sols à l'érosion dans quelques périmètres maraichers de la banlieue de Lubumbashi, travaux de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de Master en production intégrée et préservation des ressources naturelles en milieu urbain et péri-urbain, Gembloux Agro-biotech, Université de Liège, 76 pages.
21. Bodian. A, 2014. Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest) physico-géo, vol.8, pages. 297-312.
22. Bolline A., 1982. Étude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse doctorat. Géographie, Université de Liège, Belgique, 356 pages.
23. Bonvier C., 1998. Analyse et modélisation des écoulements en milieu urbain africain, Edition ORSTOM, 313 pages.
24. Bouguerra S., et Bouanani A., 2016. Cartographie qualitative de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique : cas du bassin versant Oued Boukiou (nord-ouest de l'Algérie), Etudes et gestion des sols, Vol.23, pages 91 à 100.
25. Boy D., 2009. La place de question environnementale dans le débat public, Regards croisés sur l'économie, 2009/2 (n°6), pages. 48-55.
26. Brown, R.B., 2003. Soil Texture, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL29, 8 pages.
27. Carrer G.E., 2014. Dynamique des écoulements et du stockage d'eau d'un petit bassin versant boréal influencé par une tourbière minérotrophe aqualysée des Hautes-terres de la baie de James, Québec, Canada, thèse de doctorat, Institut National de recherche scientifique, 320 pages.
28. Castany G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrologie. Brodas, Dunod, Paris, 238 pages.
29. Chaléard J.L., 1996. Les mutations de l'agriculture commerciale en Afrique de l'Ouest, A UBRY et al., 1996. Le retour au village, une solution à la crise économique au Cameroun, Harmattan-IFORD, Annales de géographie, n°592, pages. 563-583, Armand Colin.

30. Chapalain M., 2019. Dynamique des matières en suspension en mer côtière : Caractérisation, quantification et interactions sédiments/matière organique, thèse de doctorat, Institut Universitaire Européen de la Mer, 348 pages.
31. Chenanafi H, 2016. Déficit d'écoulement sur les hauts plateaux sétifiens. Méthodes de Coutagne et de Turc, Revue Agriculture. 12 (2016) pages 68-72.
32. Chocat B et al,1983. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine, 398 pages.
33. Cohen, M. et F. Rey, 2005. « Dynamiques végétales et érosion hydrique sur les marnes dans les Alpes françaises du Sud », Géomorphologie : relief, processus, environnement, n° .1, pp. 31-44, [En ligne] URL : <http://geomorphologie.revues.org/223>. DOI : 10.4000/geomorphologie.223.
34. Cormier S. M-C., 1989. Les espaces halieutiques dans les terroirs de la Casamance : modes de gestion et adaptations aux modifications de l'environnement. Paris : ORSTOM, pages. 172-185. ISBN 2-7099-0936-7. ISSN 1142-2580.
35. Cres F.N., 2001. Hydrologie urbaine quantitative : assainissement pluvial, EIER, 127 pages.
36. CSE, 2009. Annuaire sur l'environnement et les ressources naturelles du Sénégal, Centre de Suivi écologique, deuxième édition, 321 pages.
37. Dacosta. H,1989. Précipitations et écoulements sur le bassin versant de la Casamance, thèse de 3ème cycle, département géographie, FLSH, UCAD, 206 pages.
38. Dacosta. H, Konaté Y.K et Malou R., 2002. La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle/ In régional hydrology Bringing the gap between research and practice, Friend conférence (Le Cap, Afrique de Sud), H.A. J Van LANEN et S. DEMUTH édit, IAHS Publication, n°274, pages.499-506.
39. Aurore Degré, Catherine Sohier, François Colard, Nora Kummert, Alexandra Bauwens, Julie Rauw & Eléonore Beckers, « L'hydrologie, une partenaire de la géomorphopédologie pour une gestion transéchelle des grands enjeux environnementaux », BASE [En ligne], numéro spécial 2, Volume 15 (2011), 699-707 URL : <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=8188>.

40. Deveze J.C.,1996. Le réveil des campagnes africaines, éditions Karthala, 22-24, Boulevard Arago, 75013 Paris, 248 pages.
41. Deveze J.C.,2004. Les agricultures familiales africaines entre mutations et survies, Afrique contemporaine, n°210, pages.157-170.
42. Diagne M. 2000. Vulnérabilité des productions agricoles aux changements climatiques au Sénégal. Édit. Direction de l'Environnement et des Établissements Classés – Programme d'Assistance des Pays-Bas sur les Changements Climatiques, Ministère de la Jeunesse, de l'Environnement et de l'Hygiène Publique, Dakar (Sénégal), 36 pages.
43. Diedhiou A., Lo M. L., Thioune P.B.D., Diouf M., Diallo M.S., Diaw E.B., 2018. Modélisation de l'érosion hydrique des sols cultivés ou non du plateau de Thiès (Sénégal), International journal of innovation and applied studies, ISSN 2028-9324 vol.25 No. 1 Dec., pages. 210-221.
44. Diouf R.N, 2011. Etude hydro-pluviométrique des bassins versants urbains de la presqu'île de Cap-Vert, Thèse de doctorat de troisième cycle de géographie, Faculté des lettres et sciences humaines, UCAD, 269 pages.
45. Diop. E. Salif, Le Bouteillier C., Saos J.L., , 1987. Aspects géologiques et géomorphologique de la Casamance : Etude de la sédimentation actuelle, Rev. Hydrobiol. trop. 20 (3-4), pages. 219-232.
46. Division Eau et Environnement, 2004. Hydrologie des bassins versants péri-urbains équipés de réseaux séparatifs, 52 pages.
47. Djoukbal O., 2019. Etude des techniques et aménagements traditionnels de conservation de l'eau et du sol dans les montagnes du nord algérien, thèse de doctorat, Science et technologie, Centre Universitaire Belhadji-Ain Témouchent, 202 pages.
48. Dubreuil P., 1966. Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants leur détermination avec une précision acceptable, Paris, ORSTOM, 31 pages.
49. Dumas P., 2010. Méthodologie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta-Bouloupari (Nouvelle Calédonie), Revue de géographie de Bordeaux, n°252, Octobre-décembre, pages.567-584.

50. Dumas, P. et Printemps J., 2010. « Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands », Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan, pages. 856-866.
51. Dramais G., Camenen B., Le Coz J., 2018. Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable, La Houille Blanche, n°5-6, pages 96-105.
52. Dupont Y, 2003. Dictionnaire des risques, Editions Armand Colin, Paris, 417 pages.
53. El Garouani, A., H. Chen, L. Lewis, A. Triback et M. Abahrour, 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 », Télédétection, vol. 8, n° 3, pages. 193-201, [En ligne] URL : http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/Vol8No3_193_201.pdf.
54. Eslamian, S., Ghasemizadeh, M., Biabanaki, M. et Talebizadeh, M., 2010. Une méthode de régression en composantes principales pour estimer l'indice de faible débit, Gestion des ressources en eau 24, pages. 2553-2566.
55. FAO, 2018. Une Afrique rurale en mouvement. Dynamique et facteurs des migrations au sud du Sahara, rapport du CIRAD, 60 pages.
56. FAO, 2020. Etat des lieux pour le processus d'élaboration du Plan National d'Adaptation pour le secteur de l'agriculture au Sénégal, rapport produit dans le cadre du projet sécurité alimentaire une agriculture adaptée (SAGA), 56 pages.
57. Faye C., 2015. Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé et leur incidence sur l'agriculture : cas de la ville de Ziguinchor, Acte de Colloque « La recomposition des espaces urbain et péri-urbain face aux changements climatiques en Afrique de l'Ouest, IRD-Harmatan, pages.177-194.
58. Faye C., 2018. Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie. (Bassin continental Guinéo-Sénégalais), Revue marocaine de géomorphologie. N°2, pages.110-127.

59. Faye C, 2020. Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal. *Cinq Continent*, (10), pages. 80-108.
60. Faye C., Dièye S., Fall A., 2022. Impacts du changement de l'Homme sur l'érosion hydrique au Sénégal : cas du bassin versant du Soungrougrou (Affluent du fleuve Casamance), *Revue marocaine de Géomorphologie*, N°6. (2022). PP. 60- 82. ISSN: 2508-9382.
61. Gatien A, Laurent F., Corbonnois J., 2011. « Pratiques agricoles et ressources en eau des vallées principales du bassin versant de la Maine : quelles représentations ? », *VertigoO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Hors-série 10 | Décembre 2011, mis en ligne le 30 novembre 2011, consulté le 09 mai 2023. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/11382> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.11382>, 16 pages.
62. George P, Verger F., 2007. *Dictionnaire de la géographie*. Paris, Quadrige, 490 pages.
63. Gilli E, Mangan C, Maudry J., 2004. *Hydrologie : Objets, Méthodes, Application*. Paris Dunod, 303 pages.
64. Guenim A., Seddini A., Terfous A., 2010. Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest Algérien), *Hydrological Sciences Journal*, 53, pages. 448-456.
65. Guesri M., 2021. Influence de la variabilité climatique sur la production des sédiments, thèse de doctorat de troisième cycle, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, Faculté de Technologie, 181 pages.
66. Guillou M : *Analyse hydrologique et morphologique d'un cours d'eau de la plaine du Saint*
67. Guth, P.L., 2010. « Geomorphometric comparison of ASTER GDEM and SRTM », *Symposium of ISPRS Technical Commission IV & Auto.Cartography*, November 15-19, 2010 Orlando, Florida pages. 15-19, [En ligne] URL : <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part4/files/Guth.pdf>

68. Hasbaia A., Hedjazi A., Benayada L., 2012. Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna : Cas du sous-bassin versant de l'Oued elham, *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques Vétérinaires*, vol 1, pages. 28-32.
69. Hewlett J.D., 1961. Watershed Management. In « Annual Report 1961 », USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville (NC, USA), pages 61-66.
70. Hemassi T., Cherif M.A., et Habaieb H., 2014. Etude du transport Solide au niveau du bassin versant de Merguellil, Tunisie Centrale : Cas des bassins d'Ettiour et Rajela, *La Houille Blanche* N°4, pages. 88-96.
71. Houda M, 2009. Etude du fonctionnement hydrologique du bassin du Lunain, Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Université Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris et Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 47 pages.
72. Hubert G, 2000. Aménagement et gestion locale des bassins hydrographiques, Procédures de planification et processus de décision, Habilitation à diriger des recherches en aménagement de l'espace et urbanise, Université François Rabelais de Tours, 252 pages.
73. JABBAR, M.T. & CHEN, X., 2005. « Soil degradation risk prediction integrating RUSLE with geoinformation techniques, the case of northern Shaanxi province in China », *American Journal of Applied Sciences*, 2, pages. 550- 556.
74. Kabore P.N., Barbier B., Ouoba P., Kiéma A., Some L., Ouédraogo A., 2019. Perception du changement climatique, impacts environnementaux et stratégies endogènes d'adaptation par les producteurs du Centre-nord du Burkina Faso, *Vertigo*, Vol.19, N°1, 24 pages.
75. Kaci M, Habi M et Morsli B., 2017. Estimation de l'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol (USLE). Cas du bassin versant non jaugé de l'oued Rhiou, (Bassin de Cheliff) Algérie, *Geo-Eco-Trop.*, 2017, 41, 3, n.s. pages. 503-518.
76. Kamila B. A et Bouanani A., 2016. Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de Tafna. (Nord-Ouest Algérien) *Géo-Eco-Trop.*, 40, 4, pages. 277-286.

77. Kane A, 1996. Assainissement pluvial urbain du bassin versant du marigot de Wemtenga (Ouagadougou) par les techniques alternatives : Etude hydrologique et faisabilité des bassins de stockage, mémoire de master, 143 pages.
78. Karambiri C., 2017. Variabilité Climatique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin-versant du Sourou au Burkina-Faso, thèse de doctorat unique de géographie, Université Ouaga1/Professeur Joseph Ki-Zerbo, 237 pages.
79. Kazakis N., Kougias I., Patsialis T., 2015. Evaluation des zones inondables à l'échelle régionale à l'aide d'une approche basée sur un indice et d'un processus de hiérarchie analytique : Application en Région de Radope-Evros, Grèce, Science of total Environment, ELSEVIER 538, pages. 555-563.
80. Kouassi A.M., Kouame K.F., SaleyM. B., et Biemi J., 2013. Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). Larhyss Journal, N°16, pages. 121-138.
81. Kouassi A.M., Assoko A.V.S, Kouakou K.E., Djie K.B, Kouame K.F, Biemi J, 2017. Analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant du BANDAMA en Côte d'Ivoire, Larhyss journal, ISSN 1112-3680, n°31, sept 2017, pages.19-40.
82. Koulibaly A. V., 2008. Caractéristiques de la végétation et dynamique de la régénération, sous l'influence de l'utilisation des terres dans des mosaïques de forêts-savanes, des régions de la réserve de Lamto et du parc national de Comoé en Côte d'Ivoire, Thèse de doctorat, Aménagement et Ressources naturelles, Université de Cocody-Abidjan, 150 pages.
83. Laabidi A., El Hmaid A., Gourari L., Abassi M., 2016. Apports du modèle Numérique de terrain MNT à la modélisation du relief et des caractéristiques physiques du bassin du barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc), European Scientific Journal October, edition vol.12, No.29 ISSN : 1857-7881 (Print) e-ISSN 1857-7431.
84. Laborde J.P., 2009. Elément d'hydrologie de Surface. Paris, Masson, 202 pages.
85. Lambert R, 1996. Le cycle de l'eau, Toulouse, PUM, 197 pages.

86. Laurent, 2012. Maitrise en génie agricole, Université de l'Aval, 2012, 223 pages.
87. Lebel T., Janicot S., Aubertin C., Bernoux M., Dounias E., J.-F. Guegan J.F., Mazurek H., Sultan B., Reinert M., 2019. Changement climatique : Quels défis pour le Sud ? Marseille, IRD Éditions, coll. « Focus », pages. 219-231.
88. Lebel T., Vischel T., 2005. Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle. *Comptes Rendus Géoscience*, 337, pages. 29-38.
89. Lefrançois J., 2007. Dynamiques et origines des matières en suspension sur de petits versants agricoles sur Schiste, thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 281 pages.
90. Legoût C., 2015. Erosion et transferts hydrosédimentaire dans les bassins versants : Apports de la caractérisation physique des particules pour la compréhension et la modélisation des processus, habilitation à diriger des travaux de recherches, Université de Grenoble, 90 pages.
91. Lévy J. et Lussault M., 2013. Dictionnaire de Géographie et de l'espace des sociétés, La Documentation Française, Pouvoirs Locaux. (halshs-01252959), 1137 pages.
92. L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. et Triboulet J.P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 47, n° 4, p. 563-572. DOI : 10.1080/02626660209492960.
93. Lienou G., 2007. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun, Thèse de doctorat, Université de Yaoundé 1, 486 pages.
94. Mabit L, Bernard C et Laverdière M.R., 2007. Etude de la dégradation des sols par l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant la méthode du ¹³⁷CS, *AgroSolutions Juin*, Volume 18, N°1 PP. pages.12-16.
95. Macina Raky, (2008). Evaluation de l'impact de la dégradation des sols sur les performances techniques et socioéconomiques des exploitations agricoles cas de la vallée de Koutango, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Aménagement du Territoire et Gestion urbaine (ATEGU), ENEA, 145 pages.

96. Mano V., 2008. Processus Conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues-optimisation des méthodes de mesures et modélisation statistique, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 342 pages.
97. Marius, 1979. Bulletin IFAN, T.41, série A, n°4, pages. 671-691.
98. Mati, B.M., R.P.C. Morgan, F.N. Gichuki, J.N. Quinton, T.R. Brewer et H.P. Liniger., 2000. « Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper EwasoNg'iro North basin of Kenya » International Journal of Applied Earth Observation and, Geoinformation, vol. 2, n° .2, pages. 78-86.DOI : 10.1016/S0303-2434(00)85002-3.
99. Mbaye I.M., 2002. Pluie et Erosion : Caractérisation et Conséquences environnementales de la ville de Ziguinchor. Mémoire de Maitrise Géographie, UFR des Lettres et Sciences Humaines, UGB, 125 pages.
100. Mbaye M. L. et al, 2016. Variations saisonnières des matières en suspension du fleuve Sénégal en Afrique de l'Ouest Limnologica, n°56, 1-13 pages
101. Mendy A, 2014. Les aménagements hydro-agricoles des vallées de la Néma et de Médina Djikoye comme stratégies d'adaptations aux changements climatiques. Espoirs et vulnérabilités du socio-hydrosystème, Revue Ethique et économique, 11 (1), pages.110-125.
102. MERLIN P, et CHOAY. F, 2009. Dictionnaire de l'aménagement et de l'urbanisme. Paris, Presses universitaires de France.
103. Moizo, B., 2003. Perceptions et usages de la forêt en pays Bara (Madagascar), Bois et forêts des tropiques, n°. 278, pp. 25-37, [En ligne] URL : http://bft.cirad.fr/cd/BFT_278_25-37.pdf.
104. Montoroi J.P, 1998. La riziculture inondée en basse-Casamance (Sénégal) contribution des petits barrages anti-sel à la réhabilitation des bas-fonds chimiquement dégradés par la sécheresse, Actes du colloque international Cnrs-cirad, 5-7 Avril, Bordeaux, pages.303-317.
105. Morrel A, 1996. L'assainissement des eaux pluviales en milieu urbain tropical subsaharien : Luse développement-Dossier technique, 167 pages.

106. Morschel, J. et D. Fox, 2004. Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais », *M@ppemonde*, n° .76, 11 pages, [En ligne] URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.pdf>.
107. Ndiaye S., Charahabil. M.M, et Diatta M, 2021. Caractéristiques des plantations d'anacardiens (*Anacardium occidentale* L.) et déterminants économiques des exploitations en Casamance », *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Regards/Terrain, consulté, URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/28723> ;DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.28723>, 23 pages.
108. Nouaceur Z. 2015. Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes sur la rive sud du Bassin du Méditerranéen : Etude du cas du « Qaurt nord-est » algérien, XXVIIIe colloque de l'association internationale de climatologie, Liège, pages.573-578.
109. Nouaceur Z., 2019. La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne. *Physio-Géo*, vol. 15, pages. 85-109.
110. Ndong J.B., 2002. Étude des épisodes secs en saison des pluies au Sénégal de 1951 à 2002. *Annales de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université Cheikh Anta Diop*, vol. 41/B, pages. 1-15.
111. Neuvy G., 1991. *L'homme et l'eau dans le domaine tropical*, éd. Masson, Paris, 223 pages.
112. Nteranya. J. N., 2020. Cartographie de l'érosion hydrique des sols et priorisation des mesures de conservation dans le territoire d'Uvira (République démocratique du Congo), *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 20 numéro 3 | décembre 2020, mis en ligne le 01 février 2021, consulté le 22 octobre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/28888> ;DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.28888> 28 pages.
113. Olivier C., 2020. Sous les rizières, des rivières de sel. Changements environnementaux globaux, effets sur les agrosystèmes et stratégies adaptatives des riziculteurs et rizicultrices casamançais.es (Basse-Casamance, Sénégal méridional),

- Ecole Normale Supérieure de Lyon- Université Lumière Lyon II, Master Gestion des ressources naturelles et des dynamiques environnementales et paysagères), 180 pages.
114. Ouma Y. O et Tateishi R., 2014 : Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated
 115. Multi-Parametric AHP and GIS : Methodological Overview and Case study Assessment, water journal, ISSN 2073-444, 6, pages. 1515-1545; doi:10.3390/w6061515.
 116. Case Study Assessment
 117. Ouédraogo L., 2012. Gestion de l'eau et adaptation des populations au changement climatique dans le bassin versant de Yakouta (Sahel du Burkina Faso), thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni, 245pages.
 118. Pallas, A., 1984. Etude géomorphologique de la vallée du Fiherenana, thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 188 pages.
 119. Payet, E., 2009. Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du Sud-Ouest de Madagascar : le Fiherenana, Mémoire de master 2, Université de la Réunion/IRD, 54 pages .DOI : 10.4000/vertigo.12591.
 120. Payet E., Dumas P. ; and Pennober G., 2012. Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana, Vertigo, Volume 11, Number 3., pages. 1-26.
 121. Payet E., 2015. Etude des dynamiques de dégradation des sols, à l'échelle des bassins versants côtiers de l'océan Indien. Thèse de Doctorat, Géographie, Université de la Réunion, 315 pages.
 122. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Lim K., et Sadeghi S.H., 2017. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. Scientific reports, 7(1), pages. 1-12.
 123. Penman, H.L., 1963. Végétation et hydrologie. Science du sol, 96, 357 pages. <https://doi.org/10.1097/00010694-196311000-00014>.

124. Phinzi K., Ngetar N.S., 2019. The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review. *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 7, pages. 27–46.
125. Picheral H, 2001. Dictionnaire raisonné de géographie de la santé, Université Montpellier III, 308 pages.
126. Quibeuif G., 2019. Etude expérimentale du transport en sédimentaire hors équilibre, thèse de doctorat, Université de Toulouse, Institut de mécanique des fluides de Toulouse, 184 pages.
127. Ranivoson, T.A., 2007. Cartographie systématique du risque d'érosion selon RUSLE à Madagascar, Mémoire de Master, Ecole Supérieure Polytechnique Départementale Hydraulique, Université de Tananarive, 125 pages.
128. Roche P.A, 2003. L'eau enjeu vital pour l'Afrique, *Afrique contemporaine* 2003/1 (n°205), pages. 39-75.
129. Roche M., 1963. Hydrologie de surface, Gauthier-Villars, Paris, 431 pages.
130. Rodriguez F, 2010. Un modèle hydrologique distribué pour les bassins versants urbains, BLPC n°277, pages.43-63.
131. Roger Brunet, R. Ferras, H. Théry, 1992. Les mots de la géographie, dictionnaire critique, Reclus-la documentation française, 518 pages.
132. Roose, E. et J.M. Sarrailh, 1990. « Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles », *Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologique*, vol. 25, n° .12, 24 pages.
133. Rossi G, Delville. P. L et Narbeburu D. 2000. Sociétés rurales et environnement ; Gestion des ressources et dynamiques locales au Sud, Editions Kathala, Gret et Regards, 402 pages.
134. Roux C, 1996. Analyse des précipitations en hydrologie urbaine. Exemple de la Seine-Saint-Denis, thèse de doctorat en Sciences et Techniques de l'environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 291 pages.
135. Sané. T, Sy. O et Diéye. E.B., 2012. Changement climatiques et vulnérabilité sur la ville de Ziguinchor, territoires d'Afrique, GRED, 2012, pages 48-58.

136. Sané T et Mbaye I, 2007. Etat des lieux et étude diagnostive de l'environnement de la Casamance, Anale de géographie de la Faculté de Lettres et sciences humaines, n°37/B, pages. 183-201.
137. Salavati B, 2015. Impacts de l'urbanisation sur la réponse hydrologique des bassins versants urbains, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 184 pages.
138. Seck A, 1955. La moyenne Casamance. Etude de géographie physique. In Revue de géographie alpine, tome 43, n°4, pages. 707-755.
139. Séné O., 2000. Bassin versant de Yoff : Ecoulement et problèmes d'environnement, mémoire de maitrise géographie, UFR des Lettres et Sciences Humaines, UGB, 98 pages.
140. Servat É., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo M., Boyer J.F., Lubès H., Fristch J.M., Masson J.M. et Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. In : Water Resources Variability in Africa during the XXth Century, IAHS Publications, n° 252, pages. 323-337.
141. Service technique de l'urbanisme, 1982. Les eaux pluviales en milieu urbain, Paris, 31pages.
142. Soutter, M., A. Mermoud et A. Musy, 2007, Ingénierie des eaux et du sol Processus et aménagements, Presse polytechniques et universitaires romandes, 316 pages.
143. Soro T. D., Soro N., Oga Y. M. S., Lasm T. Soro G., Ahoussi K. E. et Biémi J., 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Revue Géographie Physique et Environnement, vol. 5, pages. 55-73.
144. Sow A. A. 2007. L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé, Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1232 pages.
145. Sy. O et Sané. T, 2011. Périurbanisation et vulnérabilité dans la ville de Ziguinchor (Sénégal) : le cas du quartier de Goumel. Colloque International su « Aménagement périurbain : processus, enjeux, risques et perspectives ». Laboratoire d'Analyse Géo-

- Environnement et d'Aménagement (LAGEA) de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines Sais, Fès, pages.139-151.
146. Terfous A., Megnounif A., Bouanani A, 2001. Etude du transport solide en Suspension dans l'Oued Mouilah, Revue des Sciences de l'eau, Volume14, n°2, pages.173-186.
 147. Thiaw I., Dacosta H., 2017. Mapping of Soil Erosion Risk in the Diarha Watershed Using Rusle, RS and GIS. American Journal of Remote Sensing, 5(4), pages. 30-42.
 148. Thibault S., 2011. Bassin versant, Encyclopédie de l'hydrologie et de l'assainissement, Lavoisier, 12 pages.
 149. Tine D., Faye M., Thior M., Mbaye M., Biaye L., Faye G., Tine D., (2020). Contribution of water erosion to coastal sedimentary morphodynamics : quantification using universal Soil Loss (rusle) in the kafountine watershed (southern senegal), International Journal of Agriculture, Environment and BioResearch, Vol. 5, No. 06; 2020, ISSN: 2456-8643, pages. 184-199.
 150. Touhami I., Andreu J.M., Chirino E., Sánchez J.R., Pulido-Bosch A., Martínez-Santos P., Moutahir H. & Bellot J., 2014. Comparative performance of soil water balance models in computing semi-arid aquifer recharge, Hydrological Sciences Journal, 59:1, pages.193-203, DOI: 10.1080/02626667.2013.802094.
 151. Unesco, 2021. La valeur de l'eau, Rapport mondiale des Nations-Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 12 pages.
 152. Vaillant. J.R, 1973. Protection de la qualité des eaux et maitrise de la pollution, contrôle des déversements d'eaux polluées. Collection du B. C. E. O. M, Paris, Edition Eyrolles,403 pages.
 153. Valadas B., 2011. Géomorphologie dynamique, Armand Colin, Paris, ISBN 978-2-200-26460-4, 192 pages.
 154. Vennetier M., Ladier J., Rey F., 2014. Le contrôle de l'érosion des sols forestiers par la végétation face aux changements globaux, Revue Forestière Française, LXVI (4). pages. 467-478.

155. Veyret Y, 2007. Dictionnaire de l'environnement, Editions Armand Colin, Paris, 399 pages.
156. Vidal L. et Djiba A., 2016. Étude prospective en soutien à la programmation européenne conjointe. RAPPORT FINAL Juin 2016, Contrat : FED/2015/368-323, 118 pages.
157. Viel V., 2012. Analyse spatiale et temporelle des transferts sédimentaires dans les hydrosystèmes normands, thèse de doctorat géographie physique, humaine, économique et régionale, Université de Caen Basse Normandie, 370 pages.
158. Vissin E. W., Houssou C.S., Houndénou C., 2006. « Péjoration pluviométrique et vulnérabilité des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger », Sciences de l'Environnement, LaRBE, Lomé. pages.75-92.
159. Vissin E. W., Houssou C.S., 2004. « Etude de la variabilité du bilan hydrologique dans le bassin de la Sota (Bénin, Afrique de l'Ouest) » Actes des 2èmes Journées Scientifiques des Universités nationales du Bénin, Abomey-Calavi, pages.51-61.
160. Vittecoq B., Lachassagne P., Lanini S., Maréchal J.C., 2010. Evaluation des Ressources en eau de la Martinique : Calcul Spatialisé de la pluie efficace et validation à l'échelle du bassin versant, Revue Sciences de l'eau 23 (4) pages.361-373.
161. Williams J.R., 1995. The EPIC Model, Computer Models of Watershed Hydrology Water Resources Publications : Highlands Ranch, CO, USA, pages. 909–1000.
162. Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation Planning, USDA: Washington, DC, USA.
163. Yaméogo A., Somé Y. S. T., 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, pages. 299-310.
164. Zouagui A., Sabir M., Naimi M., Chikhaoui M., Benmansour M., 2018. Modélisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental: Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc), European Scientific Journal, january 2018, Vol.14, N°3 ISSN : 1857-7881 (Print) e-1857-7431, pages.524-544.

LISTE DES CARTES

Carte 1: Situation des localités d'enquêtes dans le bassin versant de Djibonker	39
Carte 2: Situation des localités d'enquêtes dans le bassin versant d'Agnak	40
Carte 3: Situation géographique des bassins étudiés	48
Carte 4: Répartition des différentes ethnies en Casamance	51
Carte 5 : Caractéristiques topographiques du bassin versant de Djibonker	71
Carte 6 : Caractéristiques topographiques du bassin versant d'Agnak.....	72
Carte 7: Classes de pentes (%) du bassin versant de Djibonker	76
Carte 8: Classes de pentes (%) du bassin versant d'Agnak	77
Carte 9 : Hiérarchie des cours d'eau du bassin versant de Djibonker selon Strahler (1957)	80
Carte 10 : Hiérarchie des cours d'eau du bassin versant d'Agnak selon Strahler (1957).....	81
Carte 11 : Les formations géologiques du bassin de la Casamance.....	94
Carte 12 : Caractéristiques morpho-pédologiques du bassin versant de Djibonker.....	96
Carte 13 : Caractéristiques morpho-pédologiques du bassin versant d'Agnak.....	97
Carte 14 : Les types de sols dans le bassin de Djibonker	100
Carte 15 : Les types de sols dans le bassin d'Agnak	101
Carte 16 : Evolution du NDVI de 1988 à 2019 à Djibonker et Agnak	105
Carte 17 : Distribution spatiale des précipitations et migration des isohyètes en Basse-Casamance de 1951 à 2019 par rapport aux normales retenues.....	124
Carte 18 : Ressources en eau de surface de la Casamance.	138
Carte 19 : Distribution spatiale des niveaux piézométriques des eaux dans le département de Ziguinchor.....	139
Carte 20 : Distribution mensuelle des ISET en Basse-Casamance de 2003 à 2015	146
Carte 21: Synthèse des paramètres du modèle FIGUSED à Djibonker	155
Carte 22: Synthèse des paramètres du modèle FIGUSED à Agnak	156
Carte 23 : Sensibilité spatiale aux risques d'inondation dans le bassin de Djibonker	160
Carte 24 : Sensibilité spatiale aux risques d'inondation dans le bassin d'Agnak.....	161
Carte 25 : Densité des couches linéaires dans le bassin de Djibonker	164
Carte 26 : Densité des couches linéaires dans le bassin d'Agnak.....	165
Carte 27 : Densité de drainage dans le bassin versant de Djibonker	166

Carte 28 : Densité de drainage dans le bassin versant d'Agnak	166
Carte 29 : Répartition spatiale des potentialités en eau dans le bassin versant de Djibonker	170
Carte 30 : Répartition spatiale des potentialités en eau dans le bassin versant d'Agnak	171
Carte 31 : Débits, niveaux statiques et profondeurs des eaux de la nappe exploitée dans le bassin versant d'Agnak	174
Carte 32 : Débits, niveaux statiques et profondeurs des eaux de la nappe exploitée dans le bassin versant de Djibonker	175
Carte 33 : Occupation des sols dans le bassin versant de Djibonker en 2004	214
Carte 34 : Occupation des sols dans le bassin versant de Djibonker en 2020	215
Carte 35 : Occupation des sols dans le bassin versant d'Agnak en 2004	216
Carte 36 : Occupation des sols dans le bassin versant d'Agnak en 2020	217
Carte 37 : Occupation des sols de 1968 à 2020 dans le terroir villageois d'Agnak-Petit	221
Carte 38 : Occupation des sols de 1968 à 2020 à Darsalam	223
Carte 39: Occupation des sols à différentes dates autour de la vallée de Camaracounda.....	225
Carte 40 : Occupations des sols à différentes dates autour de la vallée de Mpack	227
Carte 41 : Facteur d'érodibilité des sols (K) à Djibonker et Agnak	236
Carte 42 : Evolution du facteur C de 2004 à 2020 dans les bassins versants d'Agnak et Djibonker	238
Carte 43 : Distribution spatiale des pertes de sols à Djibonker de 2004 à 2020.....	242
Carte 44 : Distribution spatiale des pertes de sols à Agnak de 2004 à 2020.....	244

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Evolution de la population des communes des bassins étudiés entre 2003 et 2015 (Source : ANSD, 2020).....	50
Figure 2: Répartition ethnique des populations des villages enquêtés.....	52
Figure 3 : Activités principales des ménages dans les bassins étudiés	55
Figure 4 : Différentes cultures développées dans les bassins étudiés selon la population interrogée	56
Figure 5 : Diversité des activités socioéconomiques dans les bassins d'étude	58
Figure 6: Courbes hypsométriques des bassins versants de Djibonker et d'Agnak.....	64
Figure 7: Transects topographiques des bassins versants de Djibonker et d'Agnak	74

Figure 8: Vue sur le plan factoriel des paramètres morphométrique et des individus des bassins de Djibonker et Agnak.....	89
Figure 9 : Evolution des totaux pluviométriques moyens mensuels aux stations de Bignona, Oussouye et Ziguinchor de 1951 à 2019.....	112
Figure 10 : Evolution des totaux pluviométriques moyens mensuels aux postes de Nyassia et Niaguis de 1981 à 2019.....	114
Figure 11: Evolution de la pluviométrie décennale à Bignona, Oussouye et Ziguinchor.....	117
Figure 12 : Mise en évidence de la rupture par le test de Buishand dans les séries pluviométriques des stations de Nyassia et de Niaguis.....	118
Figure 13: Indices pluviométriques de 1951 à 2019 à Ziguinchor, Bignona, Oussouye	121
Figure 14: Indices pluviométriques à Nyassia et Niaguis de 1981 à 2019	122
Figure 15: Variations des températures moyennes mensuelles de 1960 à 2019 à Ziguinchor...	125
Figure 16 : Evolution des températures annuelles minimales, moyennes et maximales à la station de Ziguinchor de 1960 à 2019.....	127
Figure 17 : Evolution interannuelle des précipitations et de l'ETR à la station de Ziguinchor.	129
Figure 18 : Evolution mensuelle des températures et de l'évapotranspiration potentielle à la station de Ziguinchor	131
Figure 19 : Variations de la pluviométrie et de la pluie efficace de 1960 à 2019 à la station de Ziguinchor.....	132
Figure 20: Evolution des moyennes annuelles des hauteurs d'eau terrestre aux stations de Ziguinchor, Sédhiou, Bignona, Oussouye et Bounkiling.....	142
Figure 21: Evolution moyenne mensuelle des indices de stockage d'eau (ISET) de 2003 à 2015 dans les stations étudiées	143
Figure 22 : Relations entre indices de stockage d'eau terrestre (ISET) et précipitations (mm) dans la zone d'étude.....	144
Figure 23 : Anomalies de stockage d'eau de 2003 à 2015.....	144
Figure 24 : Relations des indices normalisés (ISET, SPI et SPEI) de 2003 à 2015.....	145
Figure 25 : Côtes annuelles des hauteurs d'eau à Djibonker de 2018 à 2020.....	148
Figure 26 : Composantes et différents paramètres de la méthode FIGUSED.....	149
Figure 27: Interface du modèle HEC-HMS	179
Figure 28 : Délimitation des sous-bassins dans l'arborescence HEC-HMS	180

Figure 29 : Principe de fonctionnement du modèle (Musy, 2005)	181
Figure 30: Hydrogramme de crue de l'événement du 11 juillet 2004 et 5 juillet 2020 à Agnak.....	189
Figure 31: Hydrogramme de crue de l'événement du 21 juillet 2004 et 28 juillet 2020 à Djibonker	190
Figure 32 : Le système fluvial d'après Schumm, 1977.....	193
Figure 33 : Situation des sites de prélèvements des sédiments dans les bassins versants étudiés	195
Figure 34 : Evolution mensuelle des matières en suspension (MES).....	201
Figure 35: Répartition saisonnière des apports solides (en %) dans les sites étudiés	202
Figure 36 : Corrélation MES et hauteurs limnimétriques	203
Figure 37 : Relation réflectance Landsat 8 et MES in situ dans le marigot d'Agnak.....	204
Figure 38 : Diamètres des particules de l'eau échantillonnée dans les sites étudiés.....	205
Figure 39 : Volume des particules des échantillons prélevés à Binako et à Agnak.....	206
Figure 40 : Intérêts de l'occupation des sites étudiés selon les répondants	219
Figure 41 : Statistiques sur l'occupation des sols dans le terroir villageois d'Agnak-Petit.....	222
Figure 42 : Statistiques sur l'occupation des sols dans le terroir villageois de Darsalam de 1968 à 2020.....	224
Figure 43 : Schéma du modèle de données USLE.....	233
Figure 44 : Étapes de la cartographie de la perte en sols	239
Figure 45 : Situation topographique des champs de cultures selon les personnes interrogées dans les bassins étudiés.....	246
Figure 46 : Répondants pratiquant la jachère dans leurs champs de cultures.....	247
Figure 47 : Stratégies mises en œuvre pour lutter contre la perte des sols	250
Figure 48: La perception de la population sur la tendance de la pluviométrie	255
Figure 49: Profils de départ des exploitants agricoles migrants	259
Figure 50 : Revenus saisonniers des exploitants agricoles interrogés	259
Figure 51 : Perception de la population sur les techniques de conservation des eaux et des sols dans les vallées étudiées.....	261
Figure 52 : Schéma des acteurs potentiels intervenants autour des vallées	265

Figure 53 : Forces et contraintes de l'agriculture autour des territoires des bassins étudiés	266
Figure 54: Mode de fonctionnement des comités locaux de vallée	268
Figure 55 : Problèmes autour de la gestion de l'eau dans les bassins d'étude.....	270

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Ouvrage de rétention des eaux pluviales à Mpack (A) ; une vue de la ferme agricole aménagée par le PPDC à Bourofaye-Bainouck (B)	54
Photo 2 : (A) Riz récolté et en bottes en aval de l'ouvrage de régulation de Binako (janvier, 2020) ; (B) Femmes en pleine activité de repiquage de riz dans la vallée de Camaracounda (octobre, 2021)	57
Photo 3 : Récolte de riz par les femmes à Toubacouta dans la vallée de Mpack (janvier, 2022)	57
Photo 4: (A) Zone de pâturage de bœufs dans la vallée de Camaracounda (janvier, 2022) et (B) pêcheur artisan à Binako (octobre, 2022)	59
Photo 5: (A) Formations d' <i>Adonsonia</i> et (B), mince galerie de palétuviers aux abords du marigot de Djibonker (janvier, 2022)	103
Photo 6 : Image d'un relevé de hauteur d'eau de la station limnimétrique de Djibonker (octobre, 2021)	147
Photo 7 : (A) Puits à margelle traditionnelle destinée aux usages domestiques à Agnak-Grand (novembre, 2020) ; (B) mini-forage solaire à Baroufaye-Bainouck (juillet, 2022) et (C) Forage communautaire à Camaracounda (juin, 2023).	172
Photo 8 : Matériels utilisés pour le prélèvement.....	198
Photo 9 : Balance de pesage des filtres et site de prélèvement de Binako (Djibonker)	199
Photo 10: Le vétiver « <i>Vetiveria nigriflora</i> » reboisé pour limiter l'érosion des sols dans la vallée de Mpack (octobre, 2021)	248
Photo 11 : Digue de retenue installée par la population à Binako (novembre, 2021) et technique de billonnage.....	250
Photo 12 : Disposition des trous en <i>zai</i> manuel sur une parcelle d'aubergine (A) et (B) exploitant agricole utilisant les pesticides sur les plants d'aubergine (avril, 2021).....	262
Photo 13 : Récolte de tomate et vente de légumes dans des parcelles agricoles dans la vallée de Mpack (avril, 2021).....	263

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Cadre opératoire de la recherche.....	14
Tableau 2: Récapitulatif des villages enquêtés	41
Tableau 3: Localités polarisées par les bassins versants étudiés	47
Tableau 4 : Chronologie du conflit	54
Tableau 5 : Variables morphométriques calculées	63
Tableau 6 : Altitudes médianes, surfaces partielles et altitudes moyennes des bassins versants étudiés	65
Tableau 7: Paramètres morphométriques des bassins d'étude.....	67
Tableau 8 : Classification des différents types de relief selon l'ORSTOM.....	68
Tableau 9: Valeurs de référence sur la classification des pentes des bassins versants	75
Tableau 10: Densités de drainage des cours d'eau classifiés selon Strahler (1957)	83
Tableau 11 : Récapitulatif des densités hydrographiques des cours d'eau étudiés.....	84
Tableau 12 : Synthèse des rapports de confluence et des rapports des longueurs des cours d'eau étudiés	85
Tableau 13: Nomenclature de l'indice SPI (MKee, 1993).....	109
Tableau 14: Ecart-moyens mensuels et variations des cumuls moyens mensuels des précipitations.....	114
Tableau 15: Tendances statistiques de la température moyenne mensuelle de 1960 à 2019 à Ziguinchor.....	126
Tableau 16: Corrélation entre les données SPI mensuelles et températures moyennes mensuelles de 1960 à 2019	127
Tableau 17 : Les valeurs mensuelles du coefficient correctif la station de Ziguinchor	130
Tableau 18 : Caractéristiques des stations retenues pour les données de GRACE.....	141
Tableau 19 : Principes de hiérarchisation Analytique des paramètres des bassins d'étude	150
Tableau 20 : Indice aléatoire (Ri)	151
Tableau 21 : Synthèse des paramètres utilisés pour déterminer l'indice d'inondation bassin versant d'Agnak.....	158
Tableau 22 : Synthèses des paramètres utilisés pour déterminer l'indice d'inondation dans le bassin versant de Djibonker	159

Tableau 23 : Critères d’attribution de poids des cartes thématiques des bassins étudiés.....	167
Tableau 24 : Comparaison par paires entre les couches thématiques des bassins d’étude	168
Tableau 25 : Zones de prospection des eaux souterraines à Djibonker	168
Tableau 26 : Zone de de prospection des eaux souterraines à Agnak.....	169
Tableau 27 : Synthèse des étapes de répartition du bassin en sous-bassin sous HEC-HMS	180
Tableau 28 : Données de base du sous-bassin versant d’Agnak (2004)	182
Tableau 29 : caractéristiques des groupes de sols.....	183
Tableau 30 : Paramètres Curve-Number (CN) et variables calculées en 2004 à Agnak	184
Tableau 31 : Paramètres <i>Curve Number</i> (CN) et variables calculées en 2020 à Agnak	185
Tableau 32 : Paramètres <i>Curve-Number</i> (CN) et variables calculées en 2004 à Djibonker	185
Tableau 33 : Paramètres <i>Curve-Number</i> (CN) et variables calculées en 2020 à Djibonker	185
Tableau 34 : Ruissellement estimé dans le bassin d’Agnak en 2004 et 2020.....	188
Tableau 35 : Ruissellement estimé dans le bassin de Djibonker en 2004 et 2020.....	190
Tableau 36 : Quantité d’eau recommandée pour les prélèvements (OMM, 1994).....	197
Tableau 37 : Récapitulatif des paramètres statistiques calculés	204
Tableau 38: Classes d’occupation des sols à l’échelle d’un bassin versant.....	211
Tableau 39 : Statistiques sur l’occupation des sols en 2004 à Djibonker et Agnak.....	212
Tableau 40 : Statistiques sur l’occupation des sols en 2020 à Djibonker et Agnak.....	213
Tableau 41: Perception de la population sur l’état de la végétation naturelle	220
Tableau 42: Statistiques sur l’occupation des sols autour de la vallée de Camaracounda.....	225
Tableau 43 : Statistiques sur l’occupation des sols autour de la vallée de Mpack.....	227
Tableau 44 : Synthèse de l’évolution des classes d’occupation des sols entre 1968 et 2020 autour de la vallée de Camaracounda	228
Tableau 45 : Synthèse de l’évolution des classes d’occupations des sols entre 1968 et 2020 autour de la vallée de Mpack.	229
Tableau 46 : Hiérarchisation des pentes selon leur déclivité	235
Tableau 47 : Classification du degré d’érosion par le modèle USLE	239
Tableau 48 : Pertes de sols en 2004 et 2020 et leurs fluctuations à Djibonker.....	241
Tableau 49 : Pertes de sols en 2004 et 2020 et leurs fluctuations à Agnak	243

Tableau 50 : Quelques spéculations cultivées au niveau des vallées de Mpack et Camaracounda

ANNEXES

Annexe 1 : Résultats des tests de Pettitt

Test de Pettitt Oussouye	
K	624,000
T	1967
p-value	0,001
Alpha	0,05
La p-value a été calculée en utilisant en utilisant 1000 simulations Monte Carlo	
Intervalle de confiance à 99% autour de la p-value :] 0,013;0,019 [
Interprétation du test :	
H0 : les données sont homogènes	
Ha : Il y'a une date à partir de laquelle il y'a un changement de données	
Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification alpha=0,05, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0 et retenir l'hypothèse Ha=	
Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle vraie est inférieur à 1,62%	
Test de Pettitt Bignona	
K	550
T	1967
p-value	< 0,0001
Alpha	0,05
La p-value a été calculée en utilisant en utilisant 1000 simulations Monte Carlo	
Intervalle de confiance à 99% autour de la p-value :] 0,013;0,019 [

Interprétation du test :	
H0 : les données sont homogènes	
Ha : Il y'a une date à partir de laquelle il y'a un changement de données	
Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0 et retenir l'hypothèse Ha=	
Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle vraie est inférieur à 1,62%	
Test de Pettitt Ziguinchor	
K	478,000
T	1967
p-value	0,06
Alpha	0 ;05
La p-value a été calculée en utilisant en utilisant 1000 simulations Monte Carlo	
Intervalle de confiance à 99% autour de la p-value :] 0,013;0,019 [
Interprétation du test :	
H0 : les données sont homogènes	
Ha : Il y'a une date à partir de laquelle il y'a un changement de données	
Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0 et retenir l'hypothèse Ha=	
Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle vraie est inférieur à 1,62%	

Annexe 2 : Résultats des paramètres du curve number à et Djibonker Agnak

Sous_bassin	CN	Bas sin Slo pe m/m	Bass in Slope %	Tc (heure)	Tc (minutes)	Lagtime(tl)	S	Initial abstraction(la)mm
BV_3	76,78	0,01	1,29	8,97	538,37	323,03	76,83	15,37

BV_2	76,01	0,0 2	1,77	3,95	237,2 7	142,37	80, 15	16,03
BV_4	76,57	0,0 2	1,57	5,83	349,8 4	209,91	77, 72	15,54
BV_1	86,34	0,0 1	1,31	3,77	226,5 6	135,94	40, 18	8,04
BV_5	84,08	0,0 1	1,25	2,60	156,3 9	93,83	48, 08	9,62

Sous_ bassin	CN	Ba ssi n Slo pe m/ m	Ba ssi n Slo pe %	Tc (he ure)	Tc (mi nute s)	Lagti me(tl)	S	Iniatial abstractio n(la)mm	Superci e
BV_3	74,00	0,01	1,24	12,96	777,73	466,64	89,24	17,85	39,80
BV_2	73,50	0,01	1,15	5,20	311,76	187,05	91,58	18,32	4,96
BV_4	75,00	0,01	1,22	4,29	257,10	154,26	84,67	16,93	5,85
BV_1	77,00	0,01	1,23	4,65	279,09	167,45	75,87	15,17	7,50
BV_5	79,07	0,01	1,12	2,75	164,80	98,88	67,23	13,45	6,23

Annexe 3 : Sommaire des résultats de simulation par sous-bassins découpés par HEC-HMS

Summary Results for Subbasin "Subbasin_1_Agnack_04"	Summary Results for Subbasin "Subbasin_1_Djibonker_04"
Project: Project_Agnack Simulation Run: Run1_Agnack2004 Subbasin: Subbasin_1_Agnack_04 Start of Run: 11jul.2004, 08:00 Basin Model: Basin 1 End of Run: 11jul.2004, 23:00 Meteorologic Model: Met 1 Compute Time: 06déc.2022, 12:33:13 Control Specifications: Control 1 Volume Units: <input type="radio"/> MM <input checked="" type="radio"/> 1000 M3	Project: Project_Agnack Simulation Run: Run1_w1_djibonker2004 Subbasin: Subbasin_1_Djibonker_04 Start of Run: 21jul.2004, 08:00 Basin Model: Basin 1 End of Run: 21jul.2004, 23:00 Meteorologic Model: Met 1 Compute Time: 06déc.2022, 18:31:22 Control Specifications: Control 1 Volume Units: <input type="radio"/> MM <input checked="" type="radio"/> 1000 M3
Computed Results Peak Discharge: 34,9 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 11jul.2004, 22:30 Precipitation Volume: 800,0 (1000 M3) Direct Runoff Volume: 228,0 (1000 M3) Loss Volume: 353,9 (1000 M3) Baseflow Volume: 2,9 (1000 M3) Excess Volume: 446,1 (1000 M3) Discharge Volume: 230,9 (1000 M3)	Computed Results Peak Discharge: 12,0 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 21jul.2004, 23:00 Precipitation Volume: 543,2 (1000 M3) Direct Runoff Volume: 59,6 (1000 M3) Loss Volume: 358,5 (1000 M3) Baseflow Volume: 2,9 (1000 M3) Excess Volume: 184,7 (1000 M3) Discharge Volume: 62,5 (1000 M3)





Annexe 4 : Rapport d'analyse granulométrique des sites de mesure in situ des MES

RAPPORT D'ANALYSES

Demandeur : Manuela GRIPPA
Payeur: Manuela GRIPPA
Opérateur : Corinne Pautot
Date de l'analyse : 02/08/2022
Appareil : LA920-V2 Horiba
Technique utilisée : diffraction laser en voie humide
Normes: ISO 13320
Matériaux de référence: Duke standards Polymer Microsphères; Cat No: 4010A / Lot No: 40060
Pré-traitement des échantillons:

Les détails des analyses sont dans les onglets.

Diamètre(Microns): diamètre de la sphère de volume équivalent à la particule mesurée (en µm).

q(%): pourcentage du volume des particules à la taille correspondante (sur le volume total des particules de l'échantillon).

Passant(%): pourcentages cumulés du volume des particules à la taille correspondante (sur le volume total des particules de l'échantillon).

H= Hexanophosphate

CP= Cuve Pleine

SR=sans rien

	Echantillon ID	Commentaires
1	Agrak	1 essai; mesures réalisées en micro-cuve
2	Binako	1 essai; mesures réalisées en micro-cuve
3	KAPORE_3	3 essais : 2 gardées
4	KAPORE_4	3 essais : 2 gardées
5	KAPORE_5	5 essais : 2 gardées
6	KAPORE_6	3 essais : 2 gardées
7	KAPORE_7	6 essais : 2 gardées
8	KAPORE_8	3 essais : 2 gardées

Binako (Djibonker)

Diamètre médian	53.63946Microns	
Diamètre moyen	53.74160Microns	
Variance	547.97microns ²	
Ecart-type	23.4088Microns	
Diamètre mode	62.8017Microns	
Span	Non-actif	
Moyenne géo. diamètre	47.0464Microns	
Variance géo.	1.1609microns ²	
Diamètre pour % cumulé	(1)10.00 (%) - 21.4490Microns	(2)50.00 (%) - 53.6395Microns
D10	21.44900Microns	
D90	84.43906Microns	
D(v,0.1)	21.44900Microns	
D(v,0.5)	53.63946Microns	
D(v,0.9)	84.43906Microns	
ID#	2,0221E+14	
Transmission(R)	99.0(%)	

Transmission(B)	99.0(%)	
Ultra-sons	Non-actif	
Vitesse circulation	Non-actif	
Vitesse agitation	Non-actif	
Type de distribution	Manuel	
Base de distribution	Volume	
Indice réfraction(R)	Sédiment[IR(1.500 - 0.200i),1.33(1.330)]	
Indice réfraction(B)	Sédiment[IR(1.500 - 0.200i),1.33(1.330)]	
Nom échantillon	Manuela Grippa	
Matériau	eaux	
Source		
Numéro de lot		
Numéro du test ou essai		
Durée acquisition Echantillon(LD)	5000	
Durée acquisition Echantillon(LED)	5000	
Nom de fichier résultats	binako2-cuve	
Nom des données	binako2-cuve	
Version Algorithme	Calcul Standard	
Diamètre(Microns)	q(%)	Passant(%)
0.011	0.000	0.000
0.013	0.000	0.000
0.015	0.000	0.000
0.017	0.000	0.000
0.020	0.000	0.000
0.023	0.000	0.000
0.026	0.000	0.000
0.030	0.000	0.000
0.034	0.000	0.000
0.039	0.000	0.000
0.044	0.000	0.000
0.051	0.000	0.000
0.058	0.000	0.000
0.067	0.000	0.000
0.076	0.000	0.000
0.087	0.000	0.000
0.100	0.000	0.000
0.115	0.000	0.000
0.131	0.000	0.000

0.150	0.000	0.000
0.172	0.000	0.000
0.197	0.000	0.000
0.226	0.000	0.000
0.259	0.000	0.000
0.296	0.000	0.000
0.339	0.000	0.000
0.389	0.000	0.000
0.445	0.000	0.000
0.510	0.000	0.000
0.584	0.000	0.000
0.669	0.000	0.000
0.766	0.000	0.000
0.877	0.000	0.000
1.005	0.000	0.000
1.151	0.000	0.000
1.318	0.000	0.000
1.510	0.000	0.000
1.729	0.000	0.000
1.981	0.000	0.000
2.269	0.000	0.000
2.599	0.000	0.000
2.976	0.000	0.000
3.409	0.117	0.117
3.905	0.142	0.259
4.472	0.174	0.433
5.122	0.216	0.649
5.867	0.270	0.918
6.720	0.340	1.258
7.697	0.430	1.688
8.816	0.541	2.229
10.097	0.675	2.903
11.565	0.829	3.732
13.246	1.001	4.733
15.172	1.185	5.917
17.377	1.385	7.303
19.904	1.625	8.928
22.797	1.947	10.874
26.111	2.422	13.296
29.907	3.153	16.449

34.255	4.280	20.730
39.234	5.990	26.720
44.938	8.349	35.069
51.471	10.985	46.055
58.953	12.976	59.030
67.523	12.991	72.021
77.340	12.090	84.112
88.583	9.101	93.212
101.460	4.766	97.978
116.210	1.628	99.606
133.103	0.394	100.000
152.453	0.000	100.000
174.616	0.000	100.000
200.000	0.000	100.000
229.075	0.000	100.000
262.376	0.000	100.000
300.518	0.000	100.000
344.206	0.000	100.000
394.244	0.000	100.000
451.556	0.000	100.000
517.200	0.000	100.000
592.387	0.000	100.000
678.504	0.000	100.000
777.141	0.000	100.000
890.116	0.000	100.000
1019.515	0.000	100.000
1167.725	0.000	100.000
1337.481	0.000	100.000
1531.914	0.000	100.000
1754.613	0.000	100.000
2009.687	0.000	100.000
2301.841	0.000	100.000
2636.467	0.000	100.000
3000.000	0.000	100.000

Agnak

Diamètre médian	40.01750Microns	
Diamètre moyen	38.90705Microns	
Variance	260.68microns ²	

Ecart-type	16.1456Microns		
Diamètre mode	47.6921Microns		
Span	Non-actif		
Moyenne géo. diamètre	34.6316Microns		
Variance géo.	1.1321microns ²		
Diamètre pour % cumulé	(1)10.00 (%) - 15.6179Microns	(2)50.00 (%) - 40.0175Microns	(3)90.00 (%) - 58.7625Microns
D10	15.61788Microns		
D90	58.76252Microns		
D(v,0.1)	15.61788Microns		
D(v,0.5)	40.01750Microns		
D(v,0.9)	58.76252Microns		
ID#	2,0221E+14		
Transmission(R)	99.7(%)		
Transmission(B)	99.8(%)		
Ultra-sons	Non-actif		
Vitesse circulation	Non-actif		
Vitesse agitation	Non-actif		
Type de distribution	Manuel		
Base de distribution	Volume		
Indice réfraction(R)	Sédiment[IR(1.500 - 0.200i),1.33(1.330)]		
Indice réfraction(B)	Sédiment[IR(1.500 - 0.200i),1.33(1.330)]		
Nom échantillon	Manuela Grippa		
Matériau	eaux		
Source			
Numéro de lot			
Numéro du test ou essai			
Durée acquisition Echantillon(LD)	5000		
Durée acquisition Echantillon(LED)	5000		
Nom de fichier résultats	agrak1-cuve		
Nom des données	agrak1-cuve		
Version Algorithme	Calcul Standard		
Diamètre(Microns)	q(%)	Passant(%)	
0.011	0.000	0.000	
0.013	0.000	0.000	

0.015	0.000	0.000	
0.017	0.000	0.000	
0.020	0.000	0.000	
0.023	0.000	0.000	
0.026	0.000	0.000	
0.030	0.000	0.000	
0.034	0.000	0.000	
0.039	0.000	0.000	
0.044	0.000	0.000	
0.051	0.000	0.000	
0.058	0.000	0.000	
0.067	0.000	0.000	
0.076	0.000	0.000	
0.087	0.000	0.000	
0.100	0.000	0.000	
0.115	0.000	0.000	
0.131	0.000	0.000	
0.150	0.000	0.000	
0.172	0.000	0.000	
0.197	0.000	0.000	
0.226	0.000	0.000	
0.259	0.000	0.000	
0.296	0.000	0.000	
0.339	0.000	0.000	
0.389	0.000	0.000	
0.445	0.000	0.000	
0.510	0.000	0.000	
0.584	0.000	0.000	
0.669	0.000	0.000	
0.766	0.000	0.000	
0.877	0.000	0.000	
1.005	0.000	0.000	
1.151	0.000	0.000	
1.318	0.000	0.000	
1.510	0.000	0.000	
1.729	0.000	0.000	
1.981	0.000	0.000	
2.269	0.000	0.000	
2.599	0.000	0.000	
2.976	0.000	0.000	

3.409	0.000	0.000	
3.905	0.000	0.000	
4.472	0.130	0.130	
5.122	0.203	0.333	
5.867	0.309	0.642	
6.720	0.455	1.097	
7.697	0.647	1.744	
8.816	0.886	2.630	
10.097	1.178	3.808	
11.565	1.519	5.326	
13.246	1.877	7.203	
15.172	2.239	9.442	
17.377	2.615	12.057	
19.904	3.053	15.109	
22.797	3.638	18.747	
26.111	4.500	23.247	
29.907	5.824	29.071	
34.255	7.877	36.948	
39.234	10.963	47.911	
44.938	14.349	62.259	
51.471	15.617	77.877	
58.953	12.420	90.296	
67.523	6.407	96.703	
77.340	2.656	99.359	
88.583	0.641	100.000	
101.460	0.000	100.000	
116.210	0.000	100.000	
133.103	0.000	100.000	
152.453	0.000	100.000	
174.616	0.000	100.000	
200.000	0.000	100.000	
229.075	0.000	100.000	
262.376	0.000	100.000	
300.518	0.000	100.000	
344.206	0.000	100.000	
394.244	0.000	100.000	
451.556	0.000	100.000	
517.200	0.000	100.000	
592.387	0.000	100.000	
678.504	0.000	100.000	

777.141	0.000	100.000	
890.116	0.000	100.000	
1019.515	0.000	100.000	
1167.725	0.000	100.000	
1337.481	0.000	100.000	
1531.914	0.000	100.000	
1754.613	0.000	100.000	
2009.687	0.000	100.000	
2301.841	0.000	100.000	
2636.467	0.000	100.000	
3000.000	0.000	100.000	

Annexe 5 : Guides d'entretien et questionnaire

-Guide d'entretien adressé à la délégation régionale de l'INP-

Nom...../Prénom...../Poste

1. Comment appréciez-vous la superficie actuelle des terres cultivées par rapport aux dix dernières années ??
2. La dynamique actuelle des terres de cultures
3. Les activités agricoles destructrices des terres
4. Les raisons et acteurs des changements
5. Les moyens déployés pour accompagner les agriculteurs
6. Les techniques de protection et de conservation des sols
7. Les contraintes et limites liées à la gestion des sols dans la zone sud
8. Cultures adaptées au sol de Casamance
9. Les techniques de protection adéquates
10. Le mode d'usage des sols recommandé
11. Les techniques adaptés pour une gestion durable des sols

-Guide d'entretien adressé aux chefs des villages d'enquêtes

Prénom.....Nom.....Occupation.....Village.....

1. L'année de création du village et le premier chef
2. L'historique et les premiers occupants du village
3. Le nombre de résident actuellement dans le village

4. Quelles sont les organisations ou structures qui existent au sein du village
5. Cultures développées dans le passé
6. Problèmes agricoles majeures rencontrées (gestion de l'eau, affectation des terres à usage agricoles, etc.)
7. Les réponses communautaires pour y faire face
8. Les endroits les plus concernées par ce problème (vallées, champs de cultures, vergers, périmètre communautaire ou villageois)
9. Votre appréciation de l'engagement communautaire dans la recherche de solution pour amoindrir ou limiter les impacts
10. Les organisations ou bonnes volontés intervenant dans le village dans le domaine agricole

-Questionnaire adressée aux exploitants des vallées en contre saison

Mutations socio-économiques et développement des activités de décrues dans les vallées de Mpack et Camaracounda

Prénom et Nom

Sexe

- homme
 femme

Ethnie

- Joola
 bainouck
 mandingue
 manjack
 Peulh
 Autres

Autres (préciser)

Statut du répondant

- Autochtone
 Migrant

Si migrant, localité de provenance

Si migrant, profession de départ

Localité

Age du répondant

- 18ans
- 18ans
- 18ans-24ans
- 25-29ans
- 30-35ans
- 36-40ans
- 41-50ans
- 51-60ans
- Plus de 60ans

Formation suivie

- Aucune
- enseignement général
- agriculture
- élevage
- apiculture
- autres

Autres

Quelle est votre activité dans la zone d'arrivée ?

- Agriculture
- Pêche
- Arboriculture
- Commerce
- Elevage
- Autres

Autres préciser

Si agriculture, quel type ?

- Pluviale
- Contre saison

Type de spéculations

- Carotte
- tomate
- salade
- chou
- piment
- aubergine
- pastèque
- autres

autres

Revenus en une récolte

- 50000
- 50.000-100.000
- 100.000-150.000
- 150.000-200.000
- 200.000-250.000
- 250.000-300.000
- 300.000-350.000
- 350.000-400.000
- Autres (préciser)

Autres (préciser)

Nombre de récoltes en une campagne agricole

- une
- deux
- trois
- quatre
- plus de quatre

Quatre spéculations les plus cultivés dans l'exploitation agricole

Spéculation 1

Spéculation 2

Spéculation 3

Période de production 1

Période de production 2

Période de production 3

Période de production 4

Superficie en m2 1

Superficie en m2 2

Superficie en m2 3

Superficie en m2 4

Début de récolte 1

Début de récolte 2

Début de récolte 3

Début de récolte 4

Fin de récolte 1

Fin de récolte 2

Fin de récolte 3

Fin de récolte 4

Rendement en kg 1

Rendement en kg 2

Rendement en kg 3

Rendement en kg 4

Depuis quand êtes-vous lancés dans l'activité maraichère dans la zone?/migrant

- 5ans
- 5ans
- 10ans
- 15ans
- 20ans
- Plus de 20ans

Qu'est-ce qui justifie ce choix?

Pourquoi le choix de cette zone?

Comment accédez-vous à la parcelle agricole?

- Prêts
- achat
- bail
- location
- autres

Autres à préciser

Si achat, combien?

Si location, combien payez-vous par campagne?

Où se situe votre parcelle?

- vallée
- potager (autour de la maison)
- terre ferme
- autres

Autres (préciser)

Avez-vous une fois été en conflit lié à l'eau depuis votre arrivé ?

- Oui
- Non

Si, pourquoi

- multiples usages
- forte population
- manque d'eau
- autres

Autres (préciser)

Quels sont les problèmes qui affectent vos activités ?

- baisse de la quantité d'eau
- problème de distribution
- problème de pérennité
- salinité
- ensablement
- autres

Autres (préciser)

Parlez-nous des techniques que vous utilisez pour maintenir l'eau dans votre parcelle ?

Types d'engrais

- résidus de cultures
- feuilles de mangues
- fumées de petits ruminants
- boues de vaches
- engrais chimiques
- autres

Autres (préciser)

Pratiquez-vous des techniques de conservations des eaux et des sols ?

- Oui
- non

Si oui, lesquelles ?

- Digue traditionnelle
- demie-lune
- labour en billon
- seuil simple
- épandage d'engrais
- enfouissement d'engrais
- autres

Autres (préciser)

Dites-nous comment appréciez-vous votre activité ?

Commentaire

-Questionnaire adressée aux populations des villages des bassins d'étude

Fonctionnement hydrologique et sédimentaire des bassins-versants des marigots de Djibonker et Agnak : mutations environnementales et socioéconomiques

I. Informations socio-économiques et organisation des pratiques sociétales

I.1. Village/quartier

Age du répondant

- 18 ans
- 18-24 ans
- 24-35
- 36-45 ans
- 46-65 ans
- +65 ans

Sexe

- Homme
- Femme

I.2. Statut matrimonial

I.3. Profession

I.4. Type de formation spécifique

I.5. Ethnie

- Diola
- Mandingue
- Balante
- Mancagne
- Manjack
- Bainouck
- Autres

Autres (préciser)

I.6. Etes-vous originaire de la localité ?

- Oui
 Non

I.7. Si non, depuis quand êtes-vous installés dans la zone ?

- 0-5ans
 6-10 ans
 11-14 ans
 15-19 ans
 20 ans et plus

I.8. Avez-vous occupez le même site ?

- Oui
 Non

I.9. Si oui, comment l'avez-vous acquis?

- Héritage
 Achat
 Bail
 location
 autres

Autres (préciser)

I.10. Si non, où étiez-vous avant l'occupation actuelle ?

Quel a été la motivation/l'intérêt de l'occupation de ce site

- Agriculture
 Economique
 Familiale
 Importante mane foncière
 Autres

I.11. Activités principales du ménage

- Agriculture
 Elevage
 Pêche
 Commerce
 Autres

Autres (préciser)

Quelle est votre occupation préférée (répondant femme)

- Riziculture
- Maraichage
- Commerce
- Autres

Exploitez vous

- un champs
- une rizière
- un verger
- un potager
- une forêt
- Autres

Situation topographique des champs de cultures

- Bas fond
- Sommet
- Versant

I.6. Donner trois types de cultures saisonnières les plus pratiquées dans la zone entre 2000 et 2020?

- Arachide
- Anacarde
- Maïs
- Riz
- Sorgho
- Patate
- Sésame
- Pastèque
- Autres

Autres (préciser)

Arachide

Anacarde

Mais

Riz

Sorgho

Patate

Sésame

Pastèque

I.6. Quelle quantité récoltez-vous (première choix) ?

- Kilogramme
- Tonne
- Panier
- Tas

I.13. Quelle quantité récoltez-vous (deuxième choix)?

- Kilogramme
- Tonne
- Panier
- Tas

I.13. Quelle quantité récoltez-vous (troisième choix)?

- Kilogramme
- Tonne
- Panier
- Tas

Si Kilogramme, donner le nombre ?

Si tonne, donner le nombre ?

Si panier, donner le nombre?

Si tas, donner le nombre?

I.13. Qu'est-ce qui explique cette percée de ces cultures dans votre localité?

I.14. Avez-vous une plantation?

- Oui
 Non

Types de plantation

- Manguier
 Anacarde
 Orange
 Citron
 Autres

Autres

Estimer la surface

- 1ha
 1ha-2ha
 +2ha

I.15. Existe-t-il des acteurs externes qui vous viennent en aide ?

- Oui
 Non

I.16. Si oui, lesquels ?

- ONG
 Etats
 Comités villageois
 Associations villageois
 Autres

I.17. Si oui, par quel type d'action vous aident-ils ?

I.18. Pratiquez-vous des cultures de contre-saison ?

- Oui
 Non

I.19. Si oui, donner trois catégories ?

- Maraichage
 Riziculture
 Foresterie/arboriculture
 Palmeraie
 Autres

Autres (préciser)

I.20. Si maraichage, donner trois spéculations ?

- Oseille
 Tomate
 Salade
 Piment
 Gombo
 Oignon
 Aubergine
 Navet
 Autres

Autres

I.21. Quels sont les facteurs bloquants le développement de l'agriculture de contre-saison ?

- Mouche parasite
 Manque d'eau
 Conflits
 Disponibilité de terre
 Autres

Autres (préciser)

I.23. Avez-vous aménagé un site spécifique ?

- Parcelle destinée à la riziculture
- Périmètre aménagé
- Terre ferme
- Autres

Autres (Préciser)

I.24. Le périmètre vous appartient-il?

- Oui
- Non

I.25. Si oui, comment l'avez-vous acquis?

- Achat
- Bail
- Location
- Héritage
- Autres

Autres (préciser)

I.26. Disposez-vous un périmètre maraîcher communautaire ?

- Oui
- Non

I.27. La communauté a-t-elle obtenu un appui externe pour l'aménagement et l'entretien ?

- Oui
- Non

I.28. Si oui, par qui ?

- Structures étatiques
- Acteurs privés
- Les populations locales
- Les ressortissants du village
- Autres

Autres (préciser)

I. Elevage

II.30. Pratiquez-vous de l'élevage ?

- Oui
 Non

II.31. Si oui, quelles sont les zones privilégiées pour l'élevage ?

- Autour du bassin
 Autour des points d'eau
 Ailleurs

II.32. Y' a -t-il des zones de pâturages ?

- Oui
 Non

II.33. Si oui, quelles sont-elles ?

- Autour du marigot
 Zone de cultures de bas-fonds
 Zone de cultures de plateau
 Terre ferme
 Autres

II.34. Votre village est-il une zone de réception de troupeaux de transhumance ?

- Oui
 Non

II.35. Si oui, à quelle période ?

- Saison sèche
 Saison des pluies
 Toute l'année

III. Pêche

III.36. Pratiquez-vous des activités de pêche ?

- Oui
 Non

III.37. Si oui, à quelle période ?

- Saison pluvieuse
- Saison non pluvieuse
- A tout moment

III.38. Comment trouvez-vous les prises de poissons dans ce bassin ?

- Très suffisante
- Suffisante
- Insuffisante

III.39. Quels sont les enjeux dans le secteur de la pêche ?

- Pression sur les ressources
- Prélèvement excessif
- Baisse des précipitations
- Absence de dispositif de contrôle ou de veille
- Autres

IV. Changement des états de surface

IV.40. Qu'est-ce qu'il y'avait sur ce site avant votre installation ?

- Forêt
- Marécages
- Rizières
- Ne sais pas
- Autres

Autres (préciser)

IV.41. Le village a-t-il hérité d'une forme spécifique d'aménagement ?

- Oui
- Non

IV.42. Si oui, comment ?

- Configuration ancestrale
- Structuration informelle
- Opération de lotissement
- Autres

IV.43. Est-ce que la taille du village a augmenté?

Oui

Non

IV.44. Si oui, comment?

Multiplication des constructions

Nombre important de vergers

Autres

Autres (préciser)

IV.45. Considérez-vous que la végétation naturelle a connu une mutation ?

Ne sais pas

Dense

Moins dense

Régression

Constante

IV.46. Si y'a mutation, par quoi est-elle remplacée ?

Habitations

Champs de cultures saisonnières

Vergers

Autres

Autres (préciser)

IV.47. Est-ce qu'il y a des mares, rivières actuellement ici?

Oui

Non

IV.48. Si oui, où?

IV.49. Si oui, quels rôles jouent ces lieux ou points d'eau dans votre localité?

IV.50. Si oui, culturellement à quoi sert ce marigot ou rivière?

IV.51. Si non, y'en avait-il dans le passé?

IV.52. comment s'appelaient-ils?

IV.53. Que sont-ils devenus?

IV.54. Selon vous, comment préserver et restaurer les écosystèmes (eaux, sols et végétations)

IV. Situation environnementale des bassins et perceptions des populations sur le fonctionnement des marigots/rivières

V.55. Comment aménagez-vous votre parcelle en pré-hivernage?

- Pas besoin
- Défrichage
- Brulis
- Laboure
- Autres

Autres (préciser)

V.56. Pratiquez-vous la jachère?

- Oui
- Non

V.57. Si oui, sur combien d'année laissez-vous la (les) parcelle (s) au repos?

- 2ans
- 2ans
- 3ans
- 4ans
- 5ans
- 6ans
- +6ans

V.58. Si oui, combien de parcelles laissez-vous au repos?

- 01 parcelle
- 02 parcelles
- 03 parcelles
- +03 parcelles

V.59. Quels sont les principaux problèmes que vous rencontrez dans vos activités agricoles ?

- Variabilité pluviométrique
- Acidification
- Salinisation
- Ensablement vallée
- Plantes envahissantes
- pertes des sols
- Autres

Autres (préciser)

Si variabilité pluviométrique, quelles sont les indicateurs de la variabilité pluviométrique ?

- Début tardif des pluies
- Arrêt précoce des pluies
- Raccourcissement des jours de pluies
- Baisse des pluies
- Pluies intenses
- Irrégularité des pluies
- Pas de changement

V.60. Est-ce que dans le passé vous étiez confrontés à ce (s) type (s) de problème (s)?

- Oui
- Non

Pratiquez-vous des techniques de conservation des sols/ lutte contre la perte des sols

- Oui
- Non

Si oui, lesquels ?

- Billons
- Bandes enherbées
- Diguette traditionnelle
- Reboisement
- Autres

VI.62. Existe-t-il des digues ou barrages dans vos vallées ?

- Oui
 Non

VI.63. Si oui, qui les a installés ?

VI.64. En quelle année ?

VI.65. Un comité de gestion est-il mis en place ?

- Oui
 Non

VI.66. Si oui, comment est assuré la coordination ?

- Comité villageois
 Groupement
 Projet
 ONG
 Autres

VI.67. Qui assure la supervision de ce comité ?

- Sous-prefet
 Maire
 Chef de village
 Imam
 Notable
 Groupement de femme
 ONG
 Autres

Autres (préciser)

VI.68. Y'a-t-il une harmonisation sur/pour la période d'ouverture et de fermeture des vannes ?

- Oui
 Non

VI.69.A quelle période les vannes sont-ils ouverts ?

- Début des premières pluies
- Pleine saison des pluies
- Vers la fin de la saison
- Autres

VI.70. Existe-t-il une interaction entre les villages qui partagent la même vallée ?

- Oui
- Non

VI.71. Rencontrez-vous des problèmes liés à la gestion de l'eau dans le bassin ?

- Oui
- Non

VI.72. Si oui, lesquels ?

- Ignorance de la notion de bassin versant
- Faible compréhension de l'importance de la coordination autour de l'eau
- Absence de collectif managérial local
- Ignorance du potentiel de l'eau

VI.73. Est-ce que les eaux du bassin sont disponibles en quantité suffisantes pour vous permettre de pratiquer de l'agriculture hors saison des pluies ?

- Oui
- Non

VI.74. Selon vous que faut-il faire pour garantir une gestion coordonnée des eaux à l'échelle bassin-versant ?

VI.75. Comment partager les ressources eaux disponibles et réguler les usages ?

VI.76. Comment adapter les activités tributaires de l'eau en fonction de la disponibilité de l'eau

VI.77. Comment s'organiser ensemble pour gérer l'eau ainsi que les sols et la végétation en cohérence avec les politiques publiques ?

Table des matières

DEDICACE	2
REMERCIEMENTS.....	3
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	5
RÉSUMÉ.....	8
ABSTRACT	9
INTRODUCTION	10
PREMIÈRE PARTIE.....	18
CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET SOCIO-ÉCONOMIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	18
CHAPITRE I : CADRE THÉORIQUE DE L'ÉTUDE ET CARACTÉRISTIQUES SOCIO- ÉCONOMIQUES DES BASSINS VERSANTS ÉTUDIÉS	19
I.1. Les fondements scientifiques de l'étude	19
I.2. Définitions et discussions de quelques concepts.....	25
I.3. La méthodologie adoptée dans le cadre des enquêtes socio-économiques	36
I.4. Intérêt et finalité de l'étude	45
I.5. Études du milieu et de sa situation socio-économique.....	45
I.5.1. Population et activités socioéconomiques	49
I.5.2. Activités socioéconomiques des populations des bassins versants étudiés.....	54
Conclusion du chapitre I :	59
CHAPITRE II : MORPHOMÉTRIE, HYDRO-GÉOLOGIE, MORPHO-PÉDOLOGIE ET FORMATIONS VÉGÉTALES DES BASSINS D'ÉTUDE	61
I.1. Les éléments morpho-structuraux des bassins de Djibonker et d'Agnak	61
II.1.1. Données, matériels et méthodes utilisés	62
II.1.2. Source de données utilisées	62
II.1.3. Hypsométrie des bassins versants.....	63
II.1.4. Altitudes moyennes des bassins.....	64
II.1.5. Surfaces et périmètres.....	65
II.1.6. Indice de forme (Kc), longueur et largeur	65
II.1.7. Dénivelée spécifique.....	67

II.2.	Évolution du relief des bassins versant de Djibonker et Agnak.....	68
II.2.1.	Indices de pentes.....	75
II.3.	Un réseau hydrographique complexe.....	78
II.3.1.	Description du réseau hydrographique de la zone d'étude	78
II.3.2.	Hiérarchisation du réseau hydrographique et ordre des cours d'eau	79
II.3.3.	Longueur du cours d'eau principal	82
II.3.4.	Pente moyenne du cours d'eau principal	82
II.3.5.	Densité du drainage des cours d'eau.....	82
II.3.6.	Constante de stabilité du cours d'eau.....	83
II.3.7.	Densité hydrographique	84
II.3.8.	Rapports de confluence et de longueur des cours d'eau	84
II.3.9.	Fréquence des cours d'eau	85
II.3.10.	Coefficient de torrentialité.....	86
II.3.11.	Temps de concentration.....	86
II.3.12.	Vitesse d'écoulement de l'eau	87
II.4.	Relation entre les variables morphométriques : Analyse en Composantes principales (ACP).....	87
II.4.1.	Méthodes de traitements des variables morphométriques	88
II.5.	Analyse des éléments pédo-géologiques.....	90
II.5.1.	Étude de l'évolution géologique du bassin de la Casamance	90
II.5.2.	Morpho-pédologie des bassins étudiés	94
II.5.3.	Étude des unités pédologiques, une contribution à la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants	98
II.6.	Les caractéristiques de la végétation de la zone d'étude.....	102
II.6.1.	Evolution du couvert végétal dans les bassins versants étudiés.....	103
	Conclusion du chapitre II.....	106
CHAPITRE III : CARACTÉRISATION DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET DES VARIABLES HYDROLOGIQUES		107
III.1.	Méthodologie de traitement des données	107
III.1.1.	La détection des ruptures dans les séries de pluies	107
III.1.2.	Utilisation du test d'évolution de Mann Kendall	108

III.1.3.	Détermination des indices pluviométriques	109
III.2.	Analyse de la tendance de la pluviométrie en Basse-Casamance	110
III.2.1.	Variabilité mensuelle de la pluviométrie à Oussouye, Ziguinchor et Bignona	110
II.2.2.	Répartition mensuelle de la pluviométrie à la station de Nyassia et Niaguis.....	112
II.2.3.	Evolution de la pluviométrie à l'échelle décennale	115
III.2.4.	Variabilité interannuelle de la pluviométrie à Nyassia et à Niaguis	117
III.2.5.	Variabilité des indices pluviométriques annuels à Ziguinchor, Oussouye et Bignona	118
III.2.6.	Variabilité des indices pluviométriques à Niaguis et Nyassia	121
III.2.7.	Variabilité spatio-temporelle sur la basse des normales	122
III.3.	L'évolution des conditions thermiques en Basse-Casamance.....	125
III.3.1.	Évolution des températures mensuelles de 1960 à 2019.....	125
III.3.2.	Évolution des températures annuelles de 1960 à 2019	127
III.4.	Analyse des variables hydrologiques	127
III.4.1.	Détermination de l'évapotranspiration	128
III.4.1.1.	Détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	128
III.4.1.2.	Détermination de l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Thornthwaite	129
III.4.2.	Détermination de la pluie efficace	131
	Conclusion du chapitre III	132
	Conclusion de la première partie	134
	DEUXIÈME PARTIE.....	135
	VULNÉRABILITE DES RESSOURCES EN EAU ET ÉVALUATION DES MATÉRIAUX SÉDIMENTAIRES DES MARIGOTS DE DJIBONKER ET D'AGNAK.....	135
	CHAPITRE IV : RESSOURCES EN EAU ET ÉVALUATION DU POTENTIEL D'EAU	137
IV.1.	Ressources en eau de surface	137
IV.2.	État des ressources piézométriques (forages)	138
IV.3.	Évaluation et représentation des eaux de surface et eaux souterraines par l'approche gravimétrique	139
IV.3.1.	La mission GRACE	140
IV.3.2.	Mise en relation des hauteurs d'eau équivalentes et des pluies moyennes mensuelles dans les sites étudiés	143

IV.3.3.	Corrélation Indices de GRACE et Indices de sécheresse (SPEI).....	144
IV.3.4.	Évolution spatio-temporelle des ISET dans les sites retenus.....	145
IV.4.	Variabilité saisonnière des hauteurs d'eau limnimétrique à Djibonker	146
IV.5.	Évaluation du risque d'inondation à travers la méthode FIGUSED-S.....	148
IV.5.1.	Données et méthodes de représentation cartographique de l'indice	149
IV.5.1.1.	Poids relatifs des critères.....	149
IV.5.1.2.	Hierarchisation Analytique	150
IV.5.1.3.	Contrôle de cohérence.....	151
IV.5.1.4.	Méthodes de représentation cartographiques des paramètres du modèle FIGUSED	152
IV.5.2.	Risque d'inondation par la méthode FIGUSED-S.....	157
IV.6.	Évaluation du potentiel d'eau souterraine dans les bassins d'étude.....	162
IV.6.1.	Les différents paramètres de la prospection des eaux souterraines.....	162
IV.6.2.	L'assignation de poids des cartes par méthode multicritères AHP	167
IV.6.3.	Variation des eaux souterraines dans les bassins versants d'étude	168
IV.6.4.	Etats des sources de collectes d'eau souterraines et risques de pression sur la ressource en eau.	172
	Conclusion du chapitre IV	176
CHAPITRE V : LE MODELE HEC-HMS : UNE CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL D'EAU RUISSELE DANS LES BASSINS VERSANTS 177		
V.1.	Description du modèle HEC-HMS	177
V.2.	Méthodologie de création du modèle sous HEC-HMS.....	179
V.2.1.	La démarche pour la délimitation des sous-bassins	179
V.2.2.	Fonctionnement du modèle.....	180
V.2.3.	Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS	182
V.2.4.	Détermination des paramètres du curve number et des fichiers de simulation	182
V.3.	Les limites du modèle HEC-HMS	186
V.4.	Détermination du ruissellement et de la crue dans les bassins versants.....	187
V.4.1.	Estimation du ruissellement dans le bassin d'Agnak.....	187
V.4.2.	Estimation du ruissellement dans le bassin le bassin de Djibonker	189
	Conclusion du Chapitre V.....	191

CHAPITRES VI : EVALUATION DES FLUX SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DES MARIGOTS : QUANTIFICATION, DISTRIBUTION ET REPRESENTATION	192
VI.2. Présentation des sites de prélèvement	194
VI.2. Données et méthodes	195
VI.2.1. Données	195
VI.2.2. Méthodes d'estimations de MES	196
VI.2.2.1. Prélèvements des échantillons d'eau	196
VI.2.2.2. Procédure avant le pesage des filtres.....	198
VI.2.2.3. Procédure de collecte et pesage des filtres au GET.....	199
VI.2.2.4. Méthodes de calculs de la concentration de MES	199
VI.3. Représentation des sédiments observés sur les deux sites	200
VI.4. Distributions saisonnières des matières en suspension (MES)	201
VI.5. Relation hauteurs d'eau et matières en suspension (MES) <i>in situ</i>	202
VI.1. Relation entre réflectance satellite et MES	203
VI.1.1. Analyse granulométrique des sédiments en suspension.....	204
Conclusion du chapitre VI.....	206
Conclusion de la deuxième partie.....	208
TROISIÈME PARTIE	209
DYNAMIQUE DES ÉTATS DE SURFACE DU SOL ET CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE RUISSELLEMENT ET D'ÉROSION	209
CHAPITRE VII : LA RECOMPOSITION DES TERRITOIRES, UNE CONSÉQUENCE DE LA DYNAMIQUE DES UNITÉS PAYSAGÈRES	210
VII.1. Méthodologie utilisée pour le traitement des images satellitaires.....	210
VII.1.1. Justification des classes d'occupation des sols	210
VII.1.2. Importance de l'occupation des sols dans le processus d'infiltration et de ruissellement	211
VII.2. Analyse des états de surface en 2004 à Djibonker et Agnak	211
VII.3. Analyse de l'occupation des sols en 2020.....	213
VII.4. La dynamique des unités spatiales des bassins étudiés	218

VII.4.1.	Les facteurs des dynamiques socio-spatiales des territoires	218
VII.4.2.	Impacts des pratiques humaines sur les états de surface.....	219
VII.5.	Des mutations de quelques terroirs de la zone d'étude	220
VII.5.1.	Les mutations dans le terroir villageois d'Agnak-Petit de 1968 à 2020	220
VII.5.2.	Les mutations dans le terroir villageois de Darsalam de 1968 à 2020.....	222
VII.5.3.	Les mutations dans le terroir de Camaracounda	224
VII.5.4.	Une tendance paysagère à sens inverse dans la vallée de Mpack	226
VII.5.5.	Détection des changements intervenus entre 1968-2004, 2004-2020 et 1968-2020.....	228
	Conclusion du chapitre VII.....	230
CHAPITRES VIII : LES PERTES DES TERRES LIEES AUX MODES D'OCCUPATION DU SOL		231
VIII.5.2.	Méthodes et données	233
VIII.1.1.	Calcul de l'érosivité des pluies R.....	234
VIII.1.2.	Les facteurs topographiques LS	235
VIII.1.3.	Calcul de l'érodibilité des sols K	235
VIII.1.4.	Calcul du facteur d'occupation et de conservation des sols C et P	237
VIII.2.	État de la perte spatio-temporelle des sols dans les bassins versants étudiés.....	239
VIII.3.	Facteurs de la perte des sols	245
VIII.3.1.	La position des parcelles de culture, un facteur de la perte des sols	245
VIII.3.2.	Usages de sols et raccourcissement de la jachère, facteurs de la dégradation des terres	246
VIII.4.	Initiatives antiérosives et modes de récupération des sols	247
VIII.4.1.	Les initiatives antiérosives et orientations des services techniques	247
VIII.4.2.	Les techniques communautaires pour la gestion et la conservation des sols	248
	Conclusion du chapitre VIII	250
CHAPITRE IX : MUTATIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES, ENVIRONNEMENTALES ET DÉVELOPPEMENT DES ACTIVITÉS DANS LES TERRITOIRES DES BASSINS		252
IX.1.	Méthodologie utilisée pour la collecte et traitement des données.....	253
IX.1.1.	L'Outil SWOT, pour une analyse multicritère.....	253
IX.1.2.	Méthodes d'enquêtes auprès des exploitants agricoles	253

IX.2.	Les facteurs des mutations	254
IX.2.1.	Une pluviométrie à tendance irrégulière	254
IX.2.2.	De la crise de l'agriculture pluviale	255
IX.2.3.	Une zone au contexte socio-politique complexe.....	256
IX.3.	Les mutations observées	257
IX.3.1.	La migration agricole, moteur de développement de la culture de contre saison	257
IX.3.2.	Pratiques et techniques adaptatives en gestion de l'eau dans les vallées	260
IX.4.	Pratiques communautaires pour une gestion de l'eau, une technique efficiente de développement des activités agricoles	266
IX.4.1.	De la naissance des comités locaux de vallées	267
IX.4.2.	Les défis liés à la coordination entre acteurs communautaires	268
	Conclusion du chapitre IX	270
	Conclusion de la troisième partie.....	272
	Conclusion générale.....	273
	Références bibliographiques.....	278
	ANNEXES.....	302