



Caractérisation et valorisation des ressources en eau des bas-fonds du bassin versant du Diarha

Ibrahima Thiaw

► To cite this version:

Ibrahima Thiaw. Caractérisation et valorisation des ressources en eau des bas-fonds du bassin versant du Diarha. Hydrologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2020. Français. NNT: . tel-03253532

HAL Id: tel-03253532

<https://ird.hal.science/tel-03253532>

Submitted on 8 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



École Doctorale « Eau, Qualité et Usages de l'Eau »



Faculté des Lettres et Sciences Humaines

Année : 2019-2020 N° d'ordre : 66

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : HYDROLOGIE CONTINENTALE

Présentée et soutenue publiquement par :

Ibrahima THIAW

Le 10 Décembre 2020

**Caractérisation et valorisation des ressources en eau des bas-fonds du
bassin versant du Diarha**

Sous la Direction du Pr. Amadou Abdoul SOW avec l'encadrement de Dr.
Honoré DACOSTA

Jury:

Pr. El Hadji Salif DIOP	Professeur titulaire FLSH/UCAD	Président
Dr Luc DESCROIX	Directeur de Recherches IRD	Rapporteur
Pr Raymond MALOU	Maître de Conférences CAMES	Rapporteur
Pr Pascal SAGNA	Professeur titulaire FLSH/UCAD	Examineur
Dr Honoré DACOSTA	Maître de Conférences titulaire	Examineur
Pr Amadou Abdoul SOW	Professeur titulaire FLSH/UCAD	Directeur de thèse

Sommaire

Avant-propos et remerciements-----	3
Résumé -----	5
Abstract-----	6
INTRODUCTION GÉNÉRALE -----	7
Objectifs de l'étude-----	10
Hypothèses de recherche -----	11
État de la question -----	12
Le concept de bas-fond -----	12
Classification des bas-fonds-----	14
MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE -----	18
Collecte des données -----	19
Travaux de terrain -----	19
Traitement de l'information -----	21
1. Délimitation du bassin versant du Diarha et de ses sous bassins -----	22
2. Courbes Hauteur-Volume et Hauteur-Surface -----	29
3. Modélisation Pluie-Débit -----	31
4. Elaboration des différentes parties de la thèse -----	35
CHAPITRE I. GÉOLOGIE, HYDROGÉOLOGIE, GÉOMORPHOLOGIE, MORPHOPÉDOLOGIE ET BIOGÉOGRAPHIE-----	36
Introduction-----	37
I.1. Contexte géologique du bassin versant du Diarha -----	37
I.2. Contexte hydrogéologique du bassin du Diarha-----	40
I.3. Caractéristiques Géomorphologiques-----	42
I.4. Typologie des sols du bassin versant du Diarha-----	45
I.5. Caractéristiques Biogéographiques-----	50
Conclusion -----	54
CHAPITRE II. CARACTERISTIQUES OROHYDROGRAPHIQUES DU BASSIN DU DIARHA	55
Introduction -----	56
II.1. Caractéristiques Morphométriques -----	56
II.2. Les caractéristiques du chevelu hydrographique-----	60
Conclusion -----	64
CHAPITRE III. CARACTERISATION DES BAS-FONDS DANS LES SOUS BASSINS DU DIARHA -----	65
III.1. Caractérisation des sous bassins versants du Diarha -----	66
III.2. Analyse Statistique des Données Physiographiques-----	139
Conclusion -----	146
CHAPITRE IV. ÉLÉMENTS DU CLIMAT ET VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE-----	147
Introduction -----	148
IV.1. Circulation aérologique -----	148
IV.2. Paramètres Climatiques -----	149
IV.3. Etude de la Variabilité Pluviométrique -----	159
Conclusion -----	211
CHAPITRE V. ÉTUDE HYDROLOGIQUE DU DIARHA ET DES BAS-FONDS DE SES SOUS BASSINS -----	213
Introduction-----	214
V.1. Données hydrométriques -----	214
V.2. Écoulements annuels et interannuels -----	215
V.3. Répartition mensuelle des écoulements -----	218
V.4. Débits Caractéristiques de Crue et d'Étiage -----	222
V.5. Analyse fréquentielle des écoulements-----	223
V.8. Modélisation du fonctionnement hydrologique des bas-fonds-----	233

V.9. Classification des bas-fonds en fonction des « faciès » des régimes hydroclimatiques-----	252
Conclusion -----	256
CHAPITRE VI. IMPACTS HYDROLOGIQUES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES-----	257
Article scientifique-----	258
Résumé en français -----	258
Abstract-----	259
1. Introduction-----	260
2. Materials and Methods-----	261
3. Results -----	272
4. Discussions and Conclusions -----	282
CHAPITRE VII. IMPACTS ECOLOGIQUES DU CLIMAT-----	287
Article scientifique-----	288
Résumé en français -----	288
Abstract-----	289
1. Introduction-----	289
2. Study Area -----	291
3. Materials and methods -----	292
4. Results and discussions -----	298
5. Conclusion -----	305
CHAPITRE VIII. ETUDE DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES BAS-FONDS -----	307
Introduction -----	308
VIII.1. Perception de l'espace par les populations-----	308
VIII.2. Localisation spatiale des activités humaines-----	312
VIII.3. Impact de la Pluviométrie sur la Production Agricole -----	326
VIII.4. Le système poste-récolte-----	328
VIII.5. L'eau dans les bas-fonds-----	330
VIII.7. Les perspectives et stratégies d'adaptation -----	337
Conclusion -----	338
CONCLUSION GÉNÉRALE -----	339
BIBLIOGRAPHIE-----	342
Annexes -----	356
Table des matières -----	364
Liste des figures -----	370
Liste des Tableaux -----	377
Liste des photos -----	380
VALORISATION DE LA THESE-----	381

Avant-propos et remerciements

La maîtrise de l'eau est l'un des défis majeurs du 21^{ème} siècle, en raison de la vulnérabilité des ressources en eau, accrue par les changements climatiques et les nombreuses pressions qui pèsent sur elles. Dès lors, la connaissance du devenir des débits et de l'étendue de leur variation s'avère cruciale pour l'orientation des politiques de gestion adaptative des hydrosystèmes et le renforcement de la résilience des populations à l'insécurité alimentaire. Cette étude a porté sur le bassin versant du Diarha, un affluent du fleuve Gambie, pour caractériser les ressources en eau de ses bas-fonds, puis analyser leur mode de gestion et les contraintes de mise en valeur. Elle constitue notre contribution pour une meilleure connaissance des potentialités offertes par les agroécosystèmes de bas-fonds du sud-est du Sénégal.

Ce travail se situe à l'interface de plusieurs disciplines scientifiques : climatologie, hydrologie, géomorphologie, biogéographie, statistique, télédétection et cartographie. Elle nous a permis d'apprendre de nouvelles méthodes de travail en l'occurrence l'utilisation de la statistique, des SIG et l'informatique dans l'acquisition et le traitement des données. Son aboutissement constitue un moment décisif pour remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin ont contribué à son achèvement.

Par cette occasion, nous tenons à exprimer, à travers ce travail, toute notre gratitude au Professeur Amadou Abdoul SOW, pour avoir accepté de diriger cette thèse. Monsieur Sow a toujours porté une attention particulière à ce travail, malgré ses charges. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

À Monsieur Honoré DACOSTA qui dès mes premiers pas dans la recherche, n'a cessé de me transmettre tout ce qu'il a. Ce travail n'aurait pas été ce qu'il est sans sa direction, ses critiques et suggestions permanentes. Il est un modèle, par ses qualités scientifiques et humaines sans bornes. Je ne trouve pas les mots pour lui exprimer toute ma reconnaissance. Merci d'avoir accepté de codiriger ce travail, et pour tout.

À Madame Anastasie MENDY, pour ses orientations et soutiens tout au long de ce travail. Les discussions ont été riches, merci encore une fois pour tout.

Que tous les professeurs de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines (FLSH) et du département de Géographie (Ndiacé DIOP, Diène DIONE, Awa Fall NIANG, Pascal SAGNA, Salif DIOP, Guilgane FAYE) trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Messieurs Ibrahima THIAW, Tahirou DIAW, et Mame Demba THIAM de l'IFAN pour leurs orientations et conseils. Je resterai reconnaissant pour tous les services rendus.

Je remercie aussi :

- Le gouverneur de Kédougou William MANEL et son adjoint Jean Paul Malick FAYE, pour tous services rendus ;
- Que tous les responsables des services administratifs des Communes de Salémata, Dakately et Kéwé trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.
- Aux Messieurs Amath DIOUF chef d'Antenne de Kédougou du P2RS (Programme Multinational de Renforcement de la Résilience à l'Insécurité Alimentaire et Nutritionnelle au Sahel), Pape Codé WADE chef d'Antenne du PADAER (Programme d'Appui au Développement Agricole et à l'Entrepreneuriat Rural) et Khalidou BA, (ancien Député, Maire de Salémata) pour l'aide sans faille qu'ils m'ont apporté durant mes enquêtes de terrain. Trouvez ici l'expression de ma profonde reconnaissance.
- À Monsieur Bougoute NDAO, Maître d'Education Populaire, chef du Service Départemental de la Jeunesse et Directeur du CEDEPS de Thiès pour ses soutiens financiers et matériels tout au long de cette thèse.
- À toute l'équipe du BRGM (Abel Vincent MANGA, Bakary FATY, Saly SAMBOU, René Ndimag DIOUF, Alsane SOW), je vous exprime tous mes remerciements.

Que tous ceux (collègues, amis et parents) qui m'ont apporté leur aide dans la réalisation de la présente étude trouvent ici l'expression de mes sentiments reconnaissants. Merci beaucoup pour tout ! Je remercie particulièrement mon tuteur le Professeur Ibrahima THIAW de l'IFAN et mes parents, Coumba NDOUR et Abdoulaye pour leurs encouragements et leur patience. À mes enfants, les jumeaux Pape Honoré Abdou THIAW et Massamba THIAW ainsi qu'à leur maman Khadidiatou. Sachez que j'ai trouvé en vous la force d'avancer et la culture de l'excellence.

Une mention toute particulière va à l'endroit des exploitants des bas-fonds des Communes de Dakately, Kéwé, Salémata, et Koundara. Ils ont été d'un grand apport dans la collecte de l'information.

Toute mon entière gratitude va à l'ensemble des membres du Jury pour leur disponibilité à juger ce travail.

Résumé

Les bas-fonds du bassin du Diarha sont des hydrosystèmes où les potentialités agronomiques, hydrologiques et sylvopastorales sont favorables à la diversification et à l'intensification agricole. La caractérisation d'ensemble de ces milieux, au moyen de la Télédétection et des Systèmes d'Information Géographiques, couplés aux enquêtes quantitatives a permis de mieux comprendre les stratégies paysannes mises en œuvre pour valoriser les potentialités offertes par les agroécosystèmes de bas-fonds. En effet, malgré leur grande extension (252 km² soit 33% du bassin), les bas-fonds du bassin du Diarha sont faiblement exploités : à peine 14% de leur superficie est mise en culture. Mais, on note, depuis la sécheresse des années 1968-93, l'augmentation des pressions sur les ressources des bas-fonds qui se lisent surtout à travers l'introduction de la double culture (saison des pluies et saison sèche) et la ruée de plusieurs acteurs externes pour renforcer la résilience des paysans à l'insécurité alimentaire.

La dynamique d'exploitation des bas-fonds et les nombreuses contraintes de gestion exigent une meilleure connaissance du climat, de sa trame et du fonctionnement hydrologique que nous abordons à travers une étude spécifique faisant appel aux sciences et technologies de l'espace et à la modélisation hydrologique. Aujourd'hui, les avancées dans ces domaines permettent une compréhension de plus en plus poussée du fonctionnement hydrologique des bassins versants et de leurs unités de bas-fonds.

L'étude du climat et de sa trame ont montré l'existence de quatre périodes bien distinctes qui confirme d'une part, la tendance à la hausse de la pluviosité entre 1950 et 1967 – d'autre part, sa baisse entre 1968 et 1993 – la période avant 1950 et depuis le milieu des années 90 se ressemblent – entourant la moyenne par une forte variabilité interannuelle. La reprise des pluies, amorcée depuis le milieu des années 90, s'est accentuée au cours de la décennie 2001-2010, qui marque un retour des conditions pluviométriques à leur niveau moyen. Cette nouvelle séquence humide est associée à une recrudescence des pluies journalières extrêmes et du nombre d'épisodes pluvieux. Cette variabilité notée sur la pluviométrie a produit une variabilité similaire sur les écoulements et les productions agricoles. Les résultats de cette étude suggèrent la prise en compte du climat dans les politiques de gestion et d'exploitation durables des ressources en eau des bas-fonds du Diarha (conception d'aménagement hydraulique, hydroélectrique, définition de stratégies d'adaptation appropriées...) en vue de réduire leur vulnérabilité à l'irrégularité des pluies et la variabilité des écoulements.

Mots clés : Bassin versant du Diarha ; Bas-fonds ; Climat ; Caractérisation ; Hydrologie ; Mise en valeur agricole ; Ressources en eau ; Sciences et Technologies de l'espace.

Abstract

The Diarha watershed and its wetlands constitute hydrosystems where the agronomic, hydrological and sylvo-pastoral potentials are favorable to agricultural diversification and intensification. The characterization of all of these environments, through Remote Sensing and Geographic Information Systems, coupled with quantitative surveys, made it possible to better understand the peasant strategies implemented to enhance the potentials offered by wetland agro-ecosystems. Indeed, despite their large extensions (252 km² or 33% of the basin), the wetlands of the Diarha basin are poorly exploited: barely 14% of their area is cultivated. However, we note since the drought of 1968-1993, the increased pressure on wetlands resources, which are mainly note through the introduction of double cropping (rainy season and dry season crops) and the rush of several external actors to strengthen the resilience of farmers to food insecurity.

The dynamics of wetland exploitation and the many management constraints require better knowledge of climate, its framework and hydrological functioning, which we're tackling through a specific study calling on space science and technology and hydrological modeling. Today, advances in these fields allow an increasingly advanced understanding of the hydrological functioning of watersheds and their wetlands.

The study of the climate and its framework have shown the existence of four very distinct periods which confirms on the one hand, the upward trend in rainfall between 1950 and 1967 – on the other hand, its decrease between 1968 and 1993 – the period before 1950 and since the mid-1990s are similar – surrounding the average with strong interannual variability. The resumption of rains, which began in the mid-1990s, became more pronounced during the decade 2001-2010, which marked a return of rainfall conditions to their average level. This new wet sequence is associated with an increase in extreme daily rains and the number of rainy episodes. This variability noted in rainfall produced a similar variability in runoff and agricultural yields. The results of this study suggest that climate should be taken into account for sustainable water resource management and exploitation policies (e.g., water management design, hydroelectric development and definition of appropriate adaptation strategies...) to reduce the vulnerability of ecological systems to irregular rainfall and flow variability.

Keywords: Diarha watershed; Wetlands; Climate; Characterization; Hydrology; Agricultural development; Water resources; Space Science and Technology.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Situé entre 12°16' et 12° 36' nord et 12° 36' et 12°48' ouest (Fig.1), le bassin versant du Diarha est soumis à une forte variabilité spatiotemporelle des précipitations caractéristique du domaine tropical. Quatre périodes bien distinctes ont été mises en évidence qui confirme d'une part, la tendance à la hausse de la pluviosité entre 1950 et 1967 – d'autre part, sa baisse entre 1968 et 1993 – la période avant 1950 et depuis le milieu des années 90 se ressemblent – entourant la moyenne par une forte variabilité interannuelle. La reprise des pluies, amorcée depuis le milieu des années 90, s'est accentuée au cours de la décennie 2001-2010, qui marque un retour des conditions pluviométriques à leur niveau moyen (Thiaw I.,2015,2017). De 1968 à 1993, la pluviosité annuelle moyenne du bassin a baissé de l'ordre de 11%. Ce fléchissement de la pluviosité est imputable à la sécheresse des années 1970, amorcée depuis 1968 pour toutes stations pluviométriques étudiées.

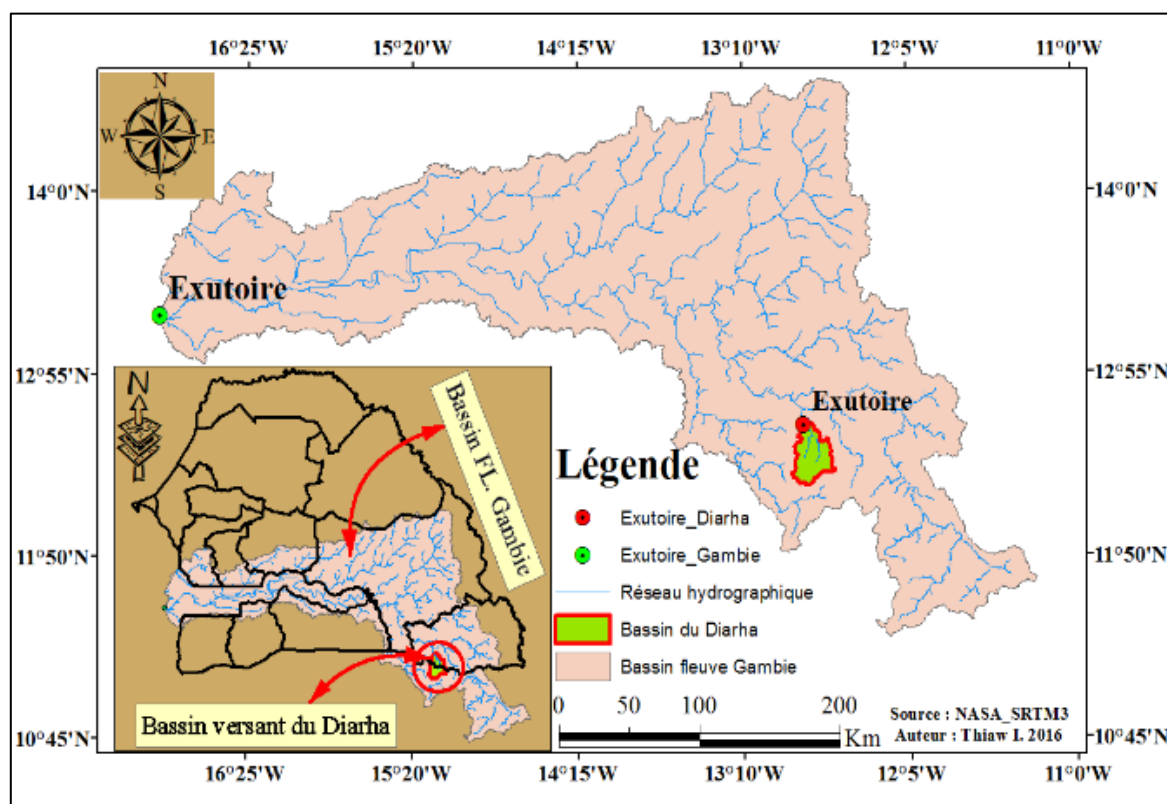


Figure 1. Localisation du bassin versant du Diarha.

En plus de modifier son régime hydrologique et ses problèmes d'érosion hydrique, la sécheresse des années 1968-1993 et la forte irrégularité des pluies, surtout sur la période 1994-2016, ont entraîné un affaiblissement des systèmes de cultures pluviales et posent maintenant un problème de l'autosuffisance. Or, selon Raunet M. (1984), « la mise en valeur des bas-fonds, petites vallées à fond plat que l'on rencontre fréquemment en région intertropicale, représente un enjeu

considérable pour le développement de l'agriculture en Afrique et à Madagascar ». Ceux du bassin versant du Diarha, depuis les années 1970, deviennent le support privilégié des activités socio-économiques notamment l'exploitation des ressources forestières et l'introduction des cultures de saisons sèches. Cependant, l'exercice de telles activités n'est pas exempt de méfaits sur l'écosystème. La conjonction de facteurs dégradants – maintien des pratiques culturelles séculaires souvent inadaptées – l'introduction de cultures de rente – concentration démographique évidente aggravée par l'abandon des sommets de versant (impropres à la culture de saison sèche) par les Bassaris, auxquels s'ajoute la forte irrégularité interannuelle des pluies, affecte la durabilité des agroécosystèmes de bas-fonds. En effet, cette concentration d'activités expose les bas-fonds à divers problèmes dont la baisse de fertilité des sols, les difficultés liées à la gestion de l'eau (Sinaré Y., Daurensan N., et Cudennec C., 1993 ; Thioubou A., 1995 ; Konaté L., 1997) et les problèmes liés à l'érosion hydrique des sols mis en évidence par Thiaw I., Dacosta H., Mendy A., *et al.* (2017).

L'État du Sénégal à travers l'acte 3 de la décentralisation et le « Plan Sénégal Emergent » (PSE), accorde une place de plus en plus importante à l'agriculture de bas-fonds pour le renforcement de la sécurité alimentaire par l'augmentation quantitative et qualitative de la production agricole. Celle-ci passe nécessairement par une amélioration de la productivité du travail à travers la mécanisation de l'agriculture, l'accroissement de la productivité par la maîtrise de l'eau, et l'amélioration des capacités techniques et organisationnelles des producteurs. À cela s'ajoute l'implication des acteurs locaux dans la recherche de solutions et la prise de décisions pour une gestion durable des ressources naturelles.

Cette thèse soulève plusieurs questions :

- le savoir-faire des paysans et l'intensification des activités dans les bas-fonds du Diarha ;
- l'augmentation des revenus paysans par la mise en valeur des bas-fonds, et les changements de comportement des paysans ;
- les pratiques locales connaissent des changements avec les mutations spatiales posant le problème de la durabilité des modes de production dans les bas-fonds du Diarha. Ces initiatives locales tiennent-elles compte des méthodes anciennes de maintien de la fertilité du sol ? Les terres et les ressources en eau des bas-fonds du Diarha sont-elles assez suffisantes pour satisfaire les besoins ou améliorer les conditions de vie des populations rurales qui les exploitent ? Les stratégies de mise en valeur des bas-fonds du bassin du Diarha sont-elles accompagnées de stratégies de préservation ou de protection des bas-fonds considérés comme des écosystèmes

très fragiles ? Les rapports entre les acteurs sont-ils des rapports de complémentarité ou de conflit ? Ces différentes questions nous permettent de définir les objectifs de notre étude.

Objectifs de l'étude

Cette thèse cherche à appréhender la dynamique hydrologique des bas-fonds du Diarha, à estimer leurs disponibilités en eau afin d'évaluer leur potentiel de développement. Il s'agit aussi de déterminer les facteurs d'évolution ou de dynamique des milieux naturels, de faire la typologie des zones à risques. Il sera aussi question d'intégrer, en même temps que les facteurs classiques (climat, cadre morphostructurale) de caractérisation des milieux, l'analyse de la perception de l'espace par les populations locales et les conséquences qui en découlent dans le domaine de la mutation des paysages. La prise en compte des aspects socio-culturels est indispensable dans la perspective de gestion durable des ressources naturelles en ce sens que « c'est de la coopération entre la recherche et le savoir local que sortiront les alternatives appropriées pour lever les contraintes de la mise en valeur des bas-fonds » (Thioubou A., 1995).

Compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques comme la valeur agronomique, la disponibilité des eaux de surface ou des nappes peu profondes et l'intensification des activités agricoles, les bas-fonds ont attiré l'attention des chercheurs de diverses disciplines (agronomes, hydrologues, ingénieurs du génie rural, etc.). La problématique que soulève cette étude, avec autant de questions, nous oriente vers les objectifs (spécifiques) suivants :

- ✓ déterminer les caractéristiques physiographiques du Diarha et de ses sous bassins ;
- ✓ Cartographier les bas-fonds du Diarha afin d'évaluer leurs potentialités ;
- ✓ Estimer les lames d'eau précipitées sur le bassin, puis analyser ses variations spatio-temporelles ;
- ✓ Caractériser les ressources en eau des bas-fonds du Diarha ;
- ✓ Analyser les impacts des pratiques spatiales et des changements climatiques sur les ressources en eau des bas-fonds et faire la typologie des zones à risque hydrique ;
- ✓ Analyser les systèmes locaux de protection et conservation des bas-fonds pratiqués par les différents acteurs entrant dans un contexte de développement durable ;

Les recherches axées sur les bas-fonds du Diarha seront basées sur un certain nombre de résultats et d'expériences existantes. La thèse de Konaté L. (1997) intitulée « *les bas-fonds dans le réseau hydrographique du fleuve Gambie : Cartographie, régime hydrologique, valorisation agricole et typologie* » ; le mémoire de Thioubou A. (1995) : « *fonctionnement, perception et*

dynamique des écosystèmes de bas-fond en Pays Bassari » et l'étude du CIEH « *Mise en valeur des bas-fonds au Sahel* », nous serviront de référence.

À l'échelle locale l'« *Etude et Implantation des Périmètres Irrigués dans le bassin de la Gambie* » de la SO.DE.FI.TEX et le Programme d'Appui au Développement Agricole et à l'Entreprenariat Rural (PADAER) serviront de canevas à notre analyse. Ces deux organismes, en collaboration avec les populations riveraines du bassin versant de la Gambie ont réalisé des aménagements dans ses bas-fonds.

Hypothèses de recherche

- Les bas-fonds étant des zones de réception, le type de matériaux constitutifs des sols en place dépend de la géologie et de la topographie, des types de sols existant dans les parties non inondables des paysages, de l'importance du réseau de drainage, de la puissance des eaux de ruissellement et d'écoulement.
- En raison des contraintes liées à la topographie, à la géologie, à l'évolution climatique, les bas-fonds constituent l'un des rares espaces où le potentiel hydro-agro-pédologique est favorable à la diversification agricole, donc à la mise en valeur optimale. Ecologiquement, ce sont aussi des zones d'habitat privilégié pour toute une faune et une flore spécifiques. Par conséquent, leur faible extension devrait suffire pour motiver un réflexe de préservation.
- Les bas-fonds sont des écosystèmes fragiles où la reconstitution des composantes, après rupture de l'équilibre environnemental est difficile voire impossible. Une meilleure connaissance de ces bas-fonds et les mécanismes de leur fonctionnement s'avèrent capitale pour la formulation de méthodes conservatoires appropriées.
- Les organisations paysannes permettent aux différents acteurs d'agir en amont et en aval de la production suite à une gestion intégrée des bas-fonds.

État de la question

Depuis la bordure nord du Sahel, jusqu'aux zones forestières du sud de la Guinée, les bas-fonds sont de plus en plus mis en valeur (Albergel J., et Lamachère J.M., 1989). Le développement des cultures dans les bas-fonds est lié à l'augmentation des contraintes de l'agriculture pluviale sur les versants : érosion des sols, la recherche dans la toposéquence de zones du paysage plus favorables, d'un point de vue alimentation hydrique des plantes (culture ou fourrage naturel), la généralisation de la culture attelée auxquelles s'ajoute l'évolution climatique qui rend les cultures et les pâturages sur les versants trop aléatoires.

Le concept de bas-fond

Plusieurs auteurs (Killian J., et Teisser J., 1973 ; Albergel J., et Lamachère J.M., 1989) ont donné différentes définitions aux bas-fonds, parmi lesquelles, celle de Raunet M. (1985) est la plus adoptée en Afrique intertropicale. Cette définition indique que « les bas-fonds, en régions intertropicales, sont les fonds plats ou concaves des vallons, petites vallées et gouttières d'écoulement inondable, qui constituent les axes de drainage élémentaires emboîtés dans les épaisses altérations des socles cristallins (pénéplanisés). Ce sont les axes de convergence préférentielle des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes phréatiques contenues dans l'épais manteau d'altération et alimentées par les pluies. Leurs sols sont engorgés ou submergés pendant une période plus ou moins longue de l'année par une nappe d'eau correspondant à des affleurements de nappe phréatique et à des apports par ruissellement ». Par ailleurs, en tenant compte de l'interaction entre les différentes composantes du milieu, la définition la plus large et la plus complète ne peut être envisagée que dans le cadre d'une équipe pluridisciplinaire. À ce propos, trois équipes ont travaillé sur le thème des bas-fonds avec des méthodes différentes.

La première équipe a été coordonnée par un réseau de recherche anglophone, Hekstra P., Andriessse W., De Vries C.A., *et al.* (1983). Elle s'est intéressée d'abord à l'ensemble des zones inondables sans restriction appelées « *Wetlands* ». Les « *Wetlands* » comprennent les deltas, les plaines d'inondation, les terres sous influence de la mer, les dépressions et les petites vallées. Certaines parties des « *Wetlands* » s'apparentent dans leurs définitions et leurs caractéristiques aux bas-fonds de RAUNET M. ; d'autres aux dépressions et aux petites vallées de Hekstra P., et Andriessse W., (1983) qui expliquent leur évolution par ces termes : « Ces vallées ont été formées dans les parties amont des bassins versants sur une longueur d'environ 25 kilomètres. Leur largeur varie de 10 mètres (à l'amont) jusqu'à 250 mètres (vers l'aval). La pente

longitudinale est de 2 à 5 %, la superficie du bassin versant est au moins 2 km² ». Le régime hydrologique de ces vallées dépend de la pluviométrie, du ruissellement sur le bassin versant et de l'écoulement des nappes. Cette définition sera reprise plus tard par Andriess W. (1986), à l'échelle des petites vallées sur des bassins versants dont la superficie est comprise entre 100 et 2000 hectares.

La seconde équipe, coordonnée par le C.I.E.H, définit les bas-fonds comme suit : « des fonds plats ou concaves des vallons et des axes d'écoulement déprimés, ne possédant pas de cours d'eau important bien marqués, submergés pendant une période de l'année par une nappe d'eau qui s'écoule. Les sols sont d'origine colluviale. Le bassin versant a une superficie variant de 1 à 200 km². Les parcelles appartiennent au même village ou à quelques villages voisins. Les aménagements de régulation d'eau relèvent d'investissements financiers faibles ou moyens. Ils peuvent être réalisés avec une forte participation paysanne. Leur gestion est compatible avec l'organisation sociale existante » (Albergel J., Bernard A., Dacosta H., *et al.* 1991).

La troisième équipe, coordonnée par le Consortium Bas-fond (CBF, 1997-2001), considère que : « les bas-fonds correspondent à la partie amont du réseau hydrographique. Leur fonctionnement met en jeu le fond de vallée lui-même et ses petites plaines alluviales, ainsi que les franges hydromorphes, les versants et les plateaux, sur toute l'étendue qui contribuent à l'alimentation hydrique du bas-fond. Leurs caractéristiques varient suivant les paramètres considérés » (Jamin J-Y., et Windmeijer P.N., 1995).

Ces définitions résultent d'un croisement de données physiques (climat, géologie, pédologie, hydrologie) et sociales (démographie, micro et macro-économie, foncier). Elles intègrent tous les paramètres qui entrent dans le fonctionnement d'un bas-fond et permettent de le caractériser comme une zone inondable éventuellement aménagée, suivant le contexte local.

La définition de Berton S. (1988), basée sur celle de Raunet M. (1982, 1984, 1985), sera adoptée dans le cadre de cette étude. Elle a l'avantage de caractériser les bas-fonds dans le contexte général du paysage et par rapport aux unités morphologiques. « Les bas-fonds sont les fonds plats des vallons et de petites vallées. Ils constituent les grands axes de drainage des eaux. Les eaux de ruissellement s'y écoulent, les nappes phréatiques s'y concentrent. Les bas-fonds subissent l'influence directe des versants et des sommets essentiellement par le biais des transports solides et liquides ». Ils sont aussi des sites privilégiés pour l'introduction de nouvelles spéculations (arboriculture, maraîchage et riziculture), la diversification et l'intensification des activités par l'entrepreneuriat rural, (Thioubou A., 1995 ; Konaté L., 1997 ; Sarr J., 2007 ; AfricaRice, 2010 ; Mendy A, 2010). Les bas-fonds permettent donc d'assurer la

sécurisation et l'accroissement des productions agro-sylvo-pastorales, contribuant ainsi à la diversification des revenus des populations rurales.

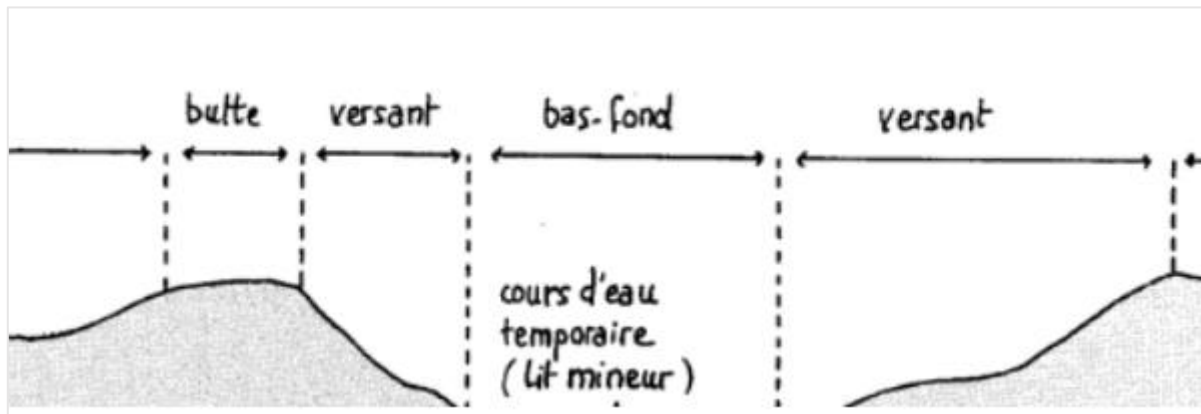


Figure 2. Coupe en travers d'un vallon (source Berton S., 1988)



Figure 3. Place du bas-fond dans la toposéquence selon Berton S., (1988)

Classification des bas-fonds

À partir des données hydrologiques recueillies par l'IRD (ex ORSTOM) sur les bassins versants représentatifs de l'Afrique de l'ouest Dubreuil P., (1972), et Albergel J., et Lamachère J.M., (1989) distinguent cinq grandes familles de bas-fonds :

✓ Dans les zones de socle ancien :

- 1) Les bas-fonds sahéliens dont la pluviométrie annuelle est comprise entre 300 et 700 mm
- 2) Les bas-fonds des régions soudano-sahéliennes (pluviométrie annuelle entre 700 et 1100mm)

- 3) Les bas-fonds de la zone soudano-guinéenne (dans laquelle appartient notre aire d'étude) avec une pluviométrie annuelle comprise entre 1100 et 1400mm.
- ✓ Dans les zones sédimentaires tertio-quaternaires :
 - 4) Les bas-fonds des formations sédimentaires du continental terminal (pluviométrie annuelle entre 300 et 900 mm dans les parties non désertiques des bassins sénégal-mauritaniennes et Iullemmeden) ;
 - 5) Les bas-fonds des zones fluviomarines dans les estuaires des fleuves et rivières depuis l'embouchure du fleuve Sénégal (pluviométrie 200 mm), aux rivières de la Guinée Bissau (pluviométrie 1600 mm).

Ce découpage est basé essentiellement sur des critères géologique, géomorphologique, et climatique pour mieux appréhender le fonctionnement hydrologique des bas-fonds. Cependant, deux classifications plus détaillées existent pour les familles 1 ; 2 et 3 : celles de Raunet M. (1982 et 1985), et de Killian J., et Teisser J., (1973).

La classification de Raunet M. (1982) est basée sur des critères morpho-géologiques permettant de mettre en évidence les contraintes à la riziculture et de proposer des types d'aménagement appropriés. Il distingue quatre familles de bas-fonds en Afrique et à Madagascar sur les surfaces d'aplanissement granito-gneissiques. Les différences qui permettent de distinguer ces quatre familles vis-à-vis des caractères morphologiques, hydrologiques et pédologiques tiennent aux actions respectives, d'une part, des eaux de surface et, d'autre part, des nappes phréatiques (hydrolyse, dégradation des argiles ...). Ces quatre familles sont les suivantes :

- les bas-fonds des régions sèches sur remblai d'envoyage argileux horizontal,
- les bas-fonds de la zone plus humide comprenant une partie centrale horizontale à remblai argileux et franges latérales concaves sableuses.
- les bas-fonds de l'Afrique de l'Est à gouttière centrale argileuse à genèse de montmorillonites,
- et les bas-fonds des zones humides à substrat horizontal « sablo-tourbeux » sur arène non ou très peu remblayée.

Killian J., et Teisser J., (1973) se sont basés principalement sur des critères morphologiques (pente, largeur du bas-fond, mesure d'encaissement), pour classer les bas-fonds. Leurs démarches reposent sur quatre grands axes :

- 1) donner une description des aspects physiques des bas-fonds :
 - bassins versants : superficie, forme, pente (transversale, longitudinale)
 - zone centrale : largeur, forme, encaissement

- jonction zone centrale – versants
 - substratum : affleurements, seuils rocheux, verrous, etc.
 - types de sols et texture
 - végétation
 - micro – relief
 - régime hydrologique actuel : inondation, écoulement
 - hydrologie : sec, humide, engorgé
- 2) mettre en évidence certaines corrélations entre certains paramètres décrits ;
- 3) dégager des clés d’interprétation photo - sol, permettant de déceler rapidement le type de bas-fond ;
- 4) et dresser un classement des types de bas-fonds ;

Cette méthodologie aboutit à la distinction de 5 types de bas-fonds :

- les bas-fonds étroits et peu marqués : ils sont fréquents en zone granitique et se distinguent par des versants rectilignes présentant de faibles pentes, comprises entre 2% et 4 % ; ils sont occupés par une forêt galerie et les franges par une savane herbacée. L’encaissement est peu marqué et les sols y sont sableux ;
- les bas-fonds étroits et marqués dont la zone centrale est occupée par une forêt galerie et les franges par une forêt plus claire ;
- les bas-fonds larges et peu marqués dont la zone centrale est occupée par une forêt galerie claire et les franges par une savane herbacée ;
- les bas-fonds larges et marqués dont la zone centrale est occupée par une forêt galerie et les franges par un recru forestier en concurrence avec les plantations ;
- et les bas-fonds de jonction avec de vastes étendues marécageuses ; la zone centrale est occupée par une forêt galerie, claire sur les bourrelets de berge.

En somme, chacune de ces typologies met en relief un caractère fondamental des bas-fonds :

- celle d’ALBERGEL J. et LAMACHERE J.M., sur le fonctionnement des bas-fonds ;
- celle de RAUNET M., sur les critères morphopédologiques en relation avec le fonctionnement hydrogéologique ;
- et celle de KILLIAN J. et TEISSER J., sur les critères de forme, en relation avec l’écologie du bassin versant.

Cependant, aucune d’elles ne tient compte des critères agronomique et socioéconomique pour une mise en valeur optimale des bas-fonds. Ces méthodes reposent essentiellement sur des critères physiques. Or, « les classifications qui résultent de ces méthodes sont alors peu fines

pour être utilisées comme outil décisionnel dans l'optique d'une mise en valeur des zones de bas-fonds. Il est donc évident qu'une classification encore plus fine sera nécessaire pour arriver à une typologie qui permet de déterminer des aménagements types adaptés à chaque classe de bas-fond » (Zeppenfeldt T., et Vlaar J.C.J., 1990).

En somme, dans l'optique d'une mise en valeur optimale des bas-fonds deux ensembles de critères s'avèrent essentielles :

- les critères régionaux : la zonation climatique – le substrat géologique et le relief – les populations qui mettent en valeur l'hydrosystème – et leur degré d'intégration à l'économie de marché.
- les critères locaux : la taille du bassin versant et la morphologie de ses bas-fonds – l'organisation sociale et foncière – la technicité des populations vis-à-vis de la maîtrise de l'eau
- et les possibilités d'accès aux sources de financement.

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Collecte des données

Pour mener cette étude plusieurs données ont été collectées :

- les données numériques du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA et celles d'ASTER de notre aire d'étude qui ont servi à l'obtention des caractéristiques morphométriques (limites, pentes, altitudes, réseau hydrographique des bassins versants) et à la cartographie des bas-fonds du Diarha ;
- Les données de sols ont permis de connaître les caractéristiques pédologiques des bas-fonds du Diarha ;
- Les données hydroclimatiques pour l'analyse de la variabilité hydro-pluviométrique, la modélisation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau des bas-fonds... ;
- Différentes données (images satellites), issues de divers services d'observation de la terre (Landsat, Google Earth...), couvrant la zone du bassin versant du Diarha, ont été collectées et traitées pour mettre en évidence les changements d'occupation des terres.
- La collecte des données socio-économiques a porté sur l'étude des interactions homme/ressource et nature/société. Cette étape est consacrée aux enquêtes quantitatives auprès des exploitants.

Travaux de terrain

Ils ont consisté à la collecte de données secondaires pour la mise à jour de la base de données hydroclimatique, la vérification des unités cartographiées (cadre morphostructurale, bas-fonds...) et les enquêtes de terrains. Ces dernières se sont articulées autour des points suivants :

- La perception des populations de leur espace ; il s'est agi d'amener les paysans à parler concrètement de leur milieu :
 - en identifiant et définissant les unités écologiques et leur fonction,
 - en évoquant l'histoire du groupe et les péripéties liées aux changements du milieu (sécheresse),
 - à se prononcer sur la vision qu'ils ont du développement de leur terroir ; les stratégies locales de mise en valeur.
- Régime foncier (statut des propriétaires fonciers, modes d'acquisition : héritage, achat, etc.) ;
- Systèmes de production et poste-récolte :
 - les moyens techniques utilisés (outils agricoles, intrants, etc.) ;

- les facteurs de production (terre, capital financier, et main d'œuvre) ;
- le niveau de production atteint (rendements, revenus financiers...).
- Commercialisation : degré d'intégration à l'économie de marché ;
- Les cultures pratiquées dans les bas-fonds, les possibilités d'aménagement et d'intensification des cultures.

Dans l'impossibilité de parcourir tous les bas-fonds du bassin versant du Diarha, le choix des bas-fonds visités repose sur l'échantillonnage raisonné. Selon Morin H., (1993) cette méthode d'échantillonnage est plus « apte et utile à la description d'un phénomène ». En plus, la base de sondage est facilement construite.

L'échantillonnage est raisonné à trois degrés :

1- Choix des préfectures

Etant donné que l'étude est orientée vers la mise en valeur agricole des bas-fonds, seules les préfectures situées sur des terres inondables sont concernées.

2- Choix des villages

Les villages choisis doivent remplir les deux critères suivants : (i) avoir comme principale activité la production agricole dans les bas-fonds et (ii) disposer d'une superficie raisonnable de bas-fonds cultivables. Les villages sont choisis de façon à répartir le nombre de bas-fonds dans les préfectures retenues.

3- Choix des bas-fonds

Il est fonction de : (i) la présence d'un cours d'eau ; (ii) l'exploitation effective ; (iii) et l'accessibilité du bas-fond.

Dans les bas-fonds, l'enquête est choisie en fonction d'un seul critère : exploitation régulière du bas-fond.

Au total 21 localités ont été investiguées dans quatre Communes situées dans le bassin versant du Diarha dont trois (Dakately, Kéwé, et Dar Salam) dans sa partie sénégalaise et une (Koundara) dans la partie guinéenne. Le tableau1 présente la répartition des bas-fonds enquêtés.

Tableau 1. Nombre de bas-fonds enquêtés par Commune

Communes	Localités	Effectifs	Fréquences %
Dakately	Thiancounoumé	9	43
	Diarra Dampoutan		
	Outioumbel		
	Diougol		
	Diouguel		
	Darou Ningou		
	Thiancoumbourou		
	Dakately Apoutane		
	Dakately Farabato		
Kéwé	Thiankoye	5	24
	Kéwé		
	Bilèle		
	Bakaouka		
Dar Salam	Gokodou	2	10
	Dar Salam		
Koundara	Mbéma	5	24
	Sabéré-Kassinian		
	Nangou		
	Termessé		
	Fangama		
	Niogola		
	Total	21	100

Traitement de l'information

Le traitement des données a consisté à l'organisation et à l'exploitation de la base de données. Pour caractériser les ressources en eau des bas-fonds du Diarha et les diverses pressions qui pèsent sur elles, la création d'un SIG s'avère capitale. Les données sont ainsi exploitées avec ArcGis, Global Mapper, Surfer (SIG et cartographie). Des logiciels tels que eCognition, Hydraccess, HyfranPlus, Khronostat, et Idrissi ont été utilisés lors du traitement des données satellitaires, climatiques et hydrologiques ; le modèle RS Minerve, pour la modélisation Pluie-débit ; Sphinx au dépouillement des questionnaires ; Xlstat et R aux calculs des paramètres statistiques et dérivés, à faire des tableurs, des graphiques, etc.

1. Délimitation du bassin versant du Diarha et de ses sous bassins

La délimitation du bassin versant du Diarha et de ses sous bassins est basée sur le traitement du MNT ASTER (30 m de résolution). Ce traitement a été facilité par le modèle HEC-GeoHMS, développé par l'*U.S Corps of Engineers*, pour caractériser les bassins versants et simuler leur réaction face aux impulsions pluviométriques. Le modèle HEC-GeoHMS est un package exécutable sous ArcMap 10.2, qui intègre plusieurs outils de géotraitement d'un MNT.

La première étape pour la délimitation d'un bassin versant par le modèle HEC-GeoHMS, consiste à la détermination des processus de terrain « *Terrain Preprocessing* ». Ainsi, après projection et correction géométrique et radiométrique du MNT ASTER, nous avons passé à la sauvegarde du projet dans un répertoire de travail dénommé « *Diarha Watershed* ». Une fois le projet sauvegardé, nous avons utilisé l'algorithme présenté à la figure 4 pour la délimitation des bassins versants. La méthodologie consiste d'abord à remplir les trous (cellules fictives) du MNT (*Fill Sinks*), qui sont souvent des erreurs occasionnées par la résolution des données ou l'arrondissement d'altitudes à la valeur entière la plus proche. Si les trous du MNT ne sont pas remplis, un réseau de drainage dérivé risque d'être discontinu.

Les modules « *Flow Direction* » et « *Flow Accumulation* » ont permis de déterminer la direction et l'accumulation des flux de chaque cellule à partir des valeurs altimétriques du MNT sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente. Cette technique retient le principe d'un cheminement naturel des eaux entraînées par la gravité et guidées par la topographie. L'étape ultime de la délimitation des bassins et du système de drainage consiste à choisir l'exutoire du bassin du Diarha et de spécifier le seuil d'accumulation des flux (*Stream Definition and Segmentation*). Le modèle délimite alors automatiquement le bassin du Diarha et ses sous bassins selon le seuil fixé et calcule en même temps la longueur du cours d'eau principal « *Longest flow Path* » en établissant un système de codification des tronçons des cours d'eau.

Après la phase de délimitation du bassin et du système de drainage, le modèle propose des options de caractérisation plus poussées pour préparer la modélisation hydrologique sous l'environnement HEC-HMS. Les modules « *Basin Processing* » et « *Characteristics* » ont été utilisés pour déterminer les centres de gravité des bassins versants (*Basin Centroid*) et les pentes des cours d'eau (*River Slope*).

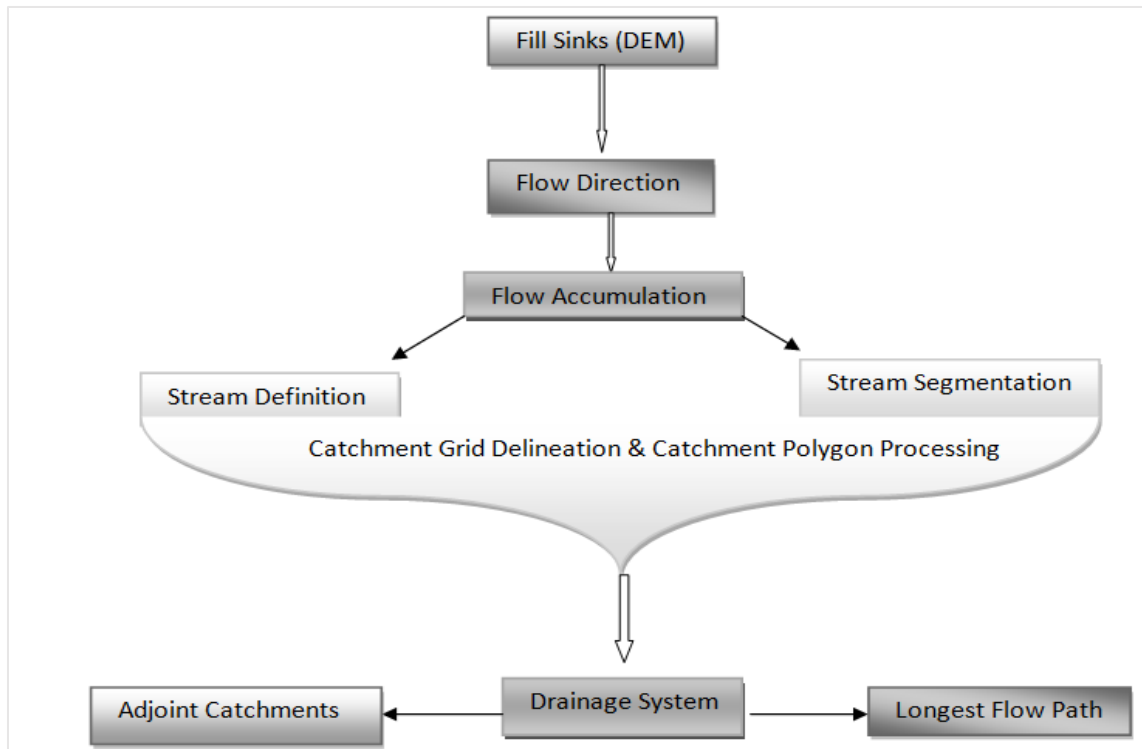


Figure 4. Algorithme pour la délimitation des bassins et du système de drainage

1.1. Caractéristiques géométrique et structurale

Les caractéristiques géométrique et structurale d'un bassin versant renseignent sur la vitesse de propagation des flux et le temps d'acheminement de l'eau d'amont en aval. Ils influencent directement, selon leur nature et intensité, le débit de pointe de l'hydrogramme de crue. C'est pourquoi Musy A., et Higy C., (2004) considèrent qu'un bassin versant de forme allongée favorise, pour une même averse, les faibles débits de pointe en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire assez importants. À l'inverse, les bassins en éventail présentent un temps de concentration plus court et auront des débits de pointe plus importants.

Le coefficient de compacité (K_c) détermine la forme du bassin. Il représente le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface tel que :

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1)$$

Avec K_c = coefficient de compacité de Gravelius, P = périmètre en kilomètre (km) et S = surface en kilomètre carré (km²). La valeur de la compacité est inversement proportionnelle à la taille du bassin versant. Plus K_c est supérieur à 1, plus le bassin est de forme allongée.

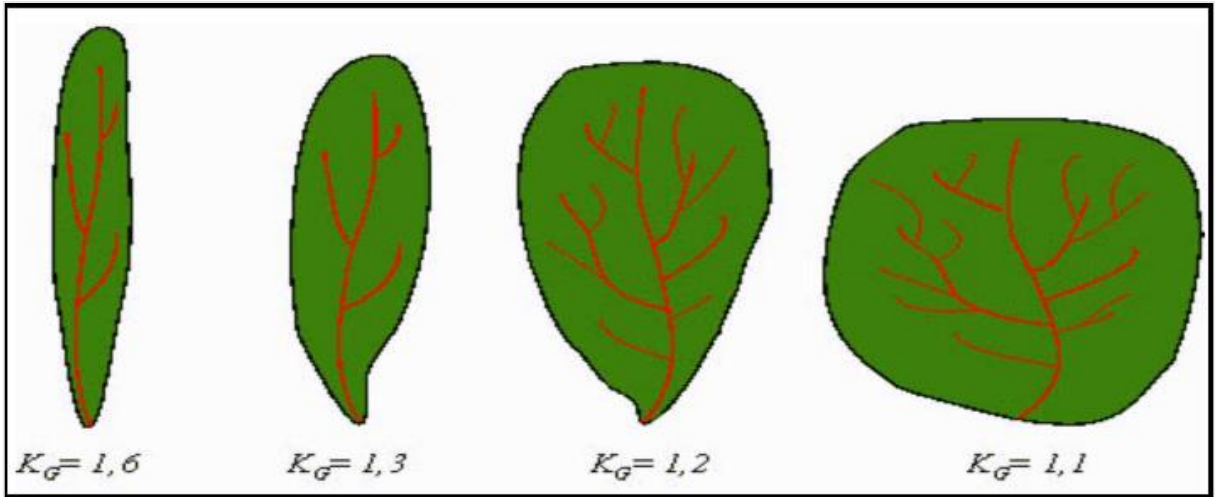


Figure 5. Indices de compacité de Gravelius et forme des bassins versants (Musy A., et Higy C., 2004)

Avec l'indice de compacité de Gravelius, les dimensions du rectangle équivalent peuvent être déterminées.

Le rectangle équivalent correspond à la transformation géométrique du Périmètre (P) du bassin versant en un rectangle de même Surface (S) et de même contour, soit à l'aide de :

$$P = 2 * (L + l); S = L * l \quad (2)$$

Les formules suivantes sont utilisées pour calculer la longueur (L) et la largeur (l) de ce rectangle :

$$L = \frac{Kc * \sqrt{S}}{1.28} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.28}{Kc} \right)^2} \right] \quad (3)$$

$$l = \frac{Kc * \sqrt{S}}{1.28} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.28}{Kc} \right)^2} \right] \quad (4)$$

Le relief d'un bassin versant est souvent caractérisé par la courbe hypsométrique (Hc) qui donne une idée synthétique de la pente et de l'allure générale du relief. Elle représente le rapport entre la somme des surfaces élémentaires (ai) comprises entre deux courbes de niveau, exprimée en km² ou en pourcentage (%), par leurs altitudes moyennes (Hi) correspondantes, sur la surface (S) totale du bassin versant ;

$$Hc = \sum \frac{H_i a_i}{S} \quad (5)$$

L'indice global de pente (Ig) représente le rapport de dénivelée entre les altitudes dépassées par 5% et 95% de la superficie du bassin versant, à la longueur (L) du rectangle équivalent. Ig indique la relation existante entre l'altitude et le rectangle équivalent. Il est donné par la formule suivante :

$$Ig = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad (6)$$

Avec $H5\%$ - $H95\%$ représentant la Dénivelée simple (D), et (L) la longueur du rectangle équivalent.

La Dénivelée spécifique (D_s) est utilisée pour corriger l'indice global de pente par rapport à la superficie du bassin versant. Il est donné par la formule suivante :

$$D_s = \frac{I_g}{\sqrt{S}} \quad (7)$$

La dénivelée maximale (ΔH) correspond à la différence d'altitude entre le point le plus éloigné ($H_{\max}$) et l'émissaire ($H_{\min}$). Soit :

$$\Delta H = H_{\max} - H_{\min} \quad (8)$$

L'indice de pente de Roche (I_p), introduit par Roche M. (1963), est défini comme la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent et pondérée par les surfaces. Il s'obtient par la formule suivante :

$$I_p = \sqrt{L} * \sum_n^1 (\sqrt{a_i \cdot d_i}) \quad (9)$$

Avec (a_i) représentant la fraction en pourcentage de la surface (S) comprise entre deux courbes de niveau voisines distantes de (d_i) et (L) la longueur du rectangle équivalent.

La pente moyenne du bassin est obtenue selon la formule suivante :

$$I_{\text{pmoy}} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\sqrt{S}} \quad (10)$$

Avec I_{pmoy} : pente moyenne ; $H_{\max}$: l'altitude maximale du bassin ; $H_{\min}$: l'altitude minimale ; et S : la Surface du bassin.

1.2. Caractérisation du réseau hydrographique

1.2.1. Densité de Drainage et Densité Hydrographique

La densité hydrographique (D_h) représente l'ensemble des éléments du paysage : végétation naturelle, espaces boisés, parcelles agricoles se situant dans un contenant lié à la circulation des eaux naturelles (bassins versants élémentaires, réseau hydrographique, etc.), et définit par le relief (pente et exposition) en rapport avec les états de surface dont l'organisation spatiale permet de définir la structuration hydrique et spatiale. Elle est obtenue en divisant le nombre total de cours d'eau par la surface du bassin versant (Horton S.E., 1932) :

$$D_h = \frac{\sum N_c}{S} \quad (11)$$

N_c : Nombre de cours d'eau et S : Surface du bassin versant

La densité de drainage se définit comme la somme des longueurs développées par tous les bras du cours d'eau (pérennes ou non) sur la surface du bassin exprimée en km/km^2 (Horton S.E., 1932) :

$$Dd = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S} \quad (12)$$

Avec L_i : Longueurs de tous les bras du cours d'eau et S : Surface du bassin versant

1.2.2. Rapport de confluence (bifurcation ratio)

Introduite par Horton S.E. (1932), le rapport de confluence (R_c) représente le rapport entre le nombre de talwegs d'ordre x et celui des talwegs d'ordre supérieur ($x + 1$), soit :

$$R_c = \frac{N_x}{N_{x+1}} \quad (13)$$

Avec R_c correspondant au rapport de confluence ; x : ordre du cours d'eau variant entre 1 et w (w est l'ordre du cours d'eau principal) ; N_x : nombre de cours d'eau d'ordre x ; et N_{x+1} : nombre de cours d'eau d'ordre suivant.

1.2.3. Rapport des Longueurs

Le rapport des longueurs R_L est le quotient de la longueur moyenne des talwegs d'ordre ($x+1$) par celle des talwegs d'ordre x (Roche M., 1960), soit :

$$R_L = \frac{l_{x+1}}{l_x} \quad (14)$$

1.2.4. Fréquence des talwegs élémentaires

Elle correspond au rapport entre le nombre de talwegs d'ordre 1 et la superficie du bassin versant. Soit :

$$F1 = \frac{N_1}{S} \quad (15)$$

Où $F1$: densité des talwegs élémentaires, N_1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1 et S : surface du bassin versant.

1.2.4. Coefficient de torrentialité

Le coefficient de torrentialité (C_t) tient compte de la densité de drainage et de celle des talwegs élémentaires d'ordre 1. Ce coefficient est le résultat du rapport de ces deux variables ; soit :

$$C_t = \frac{Dd}{F1} \quad (16)$$

Où C_t : Coefficient de torrentialité, Dd : Densité de drainage et $F1$: Fréquence des talwegs élémentaires.

1.2.5. Pente moyenne du cours d'eau

La pente moyenne d'un cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire d'un bassin versant. Cette variable influence directement le débit de pointe ($Q_{\max}$) lors d'une averse. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

Le calcul des pentes moyenne et partielle du cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} \quad (17)$$

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

1.2.6. Temps de concentration

Le temps de concentration ou temps de pointe, qui représente le temps nécessaire pour qu'une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée d'un bassin versant parvienne à l'exutoire, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques telles que la taille du bassin, sa forme, son relief et sa pente moyenne. À ces facteurs s'ajoutent non seulement les caractéristiques géologique, édaphique et biogéographique, mais aussi celles ayant trait au réseau de drainage.

Le temps de pointe peut être estimé à l'aide des caractéristiques physiques des bassins versants et de formules empiriques dont les plus utilisées sont :

- La formule de PASSINI

$$T_C = 0.108 * \frac{\sqrt[3]{S*L}}{\sqrt{P_{moy}}} \quad (18)$$

T_C : Temps de concentration en heure ; S : Surface du bassin versant (km²) ; L : Longueur du talweg en km et P_{moy} : Pente moyenne du cours d'eau (m/m).

Domaine de validité de la méthode : $Superficie > 40km^2$

- Formule de KIRPICH

$$T_C = \frac{0.0195}{60} * L^{0.77} * P_{moy}^{-0.385} \quad (19)$$

T_C : Temps de concentration en heure ; L : Longueur du talweg (m) ; P_{moy} : Pente moyenne du talweg (m/m). Domaine de validité de la méthode : $20\text{km}^2 < \text{Superficie} < 100\text{km}^2$ et $3\% < Pente < 10\%$

- Formule de VENTURA

$$Tc = 0.1272 * \sqrt{S/P_{moy}} \quad (20)$$

T_C : Temps de concentration en heure ; S : Superficie du bassin versant (km^2) et P_{moy} : Pente moyenne du talweg en m/m.

Domaine de validité de la méthode : $\text{Superficie} > 10\text{km}^2$

Dans cette étude, la valeur du T_c correspond à la moyenne des temps de pointe des trois méthodes choisies.

1.2.7. Nature fractale des réseaux hydrographiques

La fractalité est une propriété de certains objets irréguliers, dont les objets ramifiés (réseau hydrographique), « que l'on peut décomposer en parties, chacune de ces parties étant une version à l'échelle réduite de l'ensemble » (Mandelbrot B., 1989).

La géométrie fractale (Mandelbrot B., 1982 ; Schroeder M., 1991 ; Mandelbrot B., 1995), développé sur cette propriété, s'avère être un outil de description des réseaux hydrographiques. En outre, Mandelbrot B., (1995) affirme qu'elle peut aider à identifier la structure de systèmes complexes dont le chevelu hydrographique.

Les travaux pour décrire les réseaux hydrographiques à travers l'outil fractal ont été synthétisés par Cudennec C., (2000) qui concluent qu'un réseau hydrographique peut être vu comme un objet fractal ou multi-fractal (Rodriguez-Iturbe I., et Rinaldo A., 1997), au sens statistique du terme. En effet, un réseau hydrographique est avant tout un objet auto affine, mais qui varie en fonction des aléas affectant le processus morphogénétique.

Pour la dimension fractale d'un réseau hydrographique, La Barbera P., et Rosso R., (1989) proposent l'expression suivante :

$$D = \frac{\ln R_c}{\ln R_L} \quad (21)$$

Où R_c et R_L sont les rapports de confluence et de longueur définis par les équations (13) et (14). Si la dimension fractale (d) des linéaires des biefs n'est pas négligée (en considérant tous les ordres des cours d'eau), alors la dimension fractale totale du réseau hydrographique devient (Liu T., 1992) :

$$Dt = d \times D \quad (22)$$

Où d est exprimé en fonction de deux des rapports de Horton :

$$d = 2 \times \frac{\ln RL}{\ln RA} \quad (23)$$

Mandelbrot B. (1995) considère que la dimension fractale (D) d'un réseau hydrographique tend vers 2, car c'est un objet qui remplit le plan, c'est-à-dire qui draine intégralement son bassin versant. La Barbera P., et Rosso R., (1989) considèrent que D tend vers 2 lorsque le réseau atteint sa maturité, mais que, dans la réalité, les contraintes physiques du bassin, en l'occurrence la géologie et la topographie, rendent cette maturité inaccessible. En outre, Cudennec C. (2000) abondant dans le même sens, estime que « la limite de l'autosimilarité constituée par le seuil naturel d'apparition des chenaux ne permet pas le remplissage du plan, ce qui éloigne de fait la dimension fractale de la valeur de 2 ». Liu T. (1992) trouve les valeurs moyennes suivantes :

$$Dt \cong 1.82 \quad (24)$$

$$D \cong 1.55 \quad (25)$$

$$d \cong 1.2 \quad (26)$$

Ces valeurs sont cohérentes avec la valeur 1.2 de la dimension fractale d'une courbe géomorphologique proposée par Mandelbrot B. (1982).

Liu T. (1992) propose, en plus, deux autres dimensions fractales décrivant les caractéristiques dynamiques d'un réseau hydrographique, l'une de dispersion et l'autre spectrale. La dimension de dispersion (d_p) correspond à la fonction de transfert à travers le réseau et est définie par la relation :

$$d_p = Dt \times \left(1 + \frac{1}{D}\right) \quad (27)$$

La dimension spectrale (d_s) caractérise quant à elle la connectivité du réseau et est définie par la relation suivante :

$$d_s = \frac{2 \times D}{1 + D} \quad (28)$$

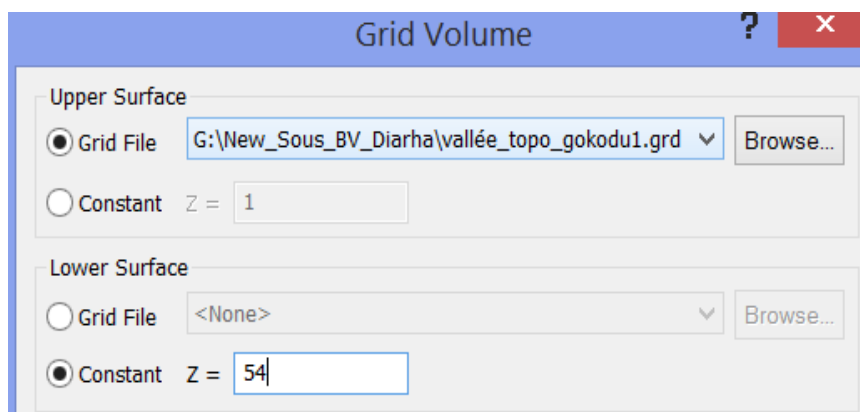
2. Courbes Hauteur-Volume et Hauteur-Surface

Les courbes hauteur-volume-surface des bas-fonds du Diarha ont été construites à l'aide du logiciel Surfer 14. Cet outil nous a permis de générer par interpolation les courbes de niveau des bas-fonds à un pas de temps de 1 m. La partie en dehors de la limite des bas-fonds a été coupée via l'outil *Blank* du logiciel.

Une fois que la limite des bas-fonds est bien définie, le logiciel utilise une option de calcul de volume et de surface (Photo 1). En effet, le principe de calcul du volume est l'intégration entre une surface plane à définir et la surface 3D (surface contenant les courbes de niveau). La surface

plane est définie par un $Z=\text{constante}$ et représente une côte définie par l'utilisateur. Nous avons alors recherché des relations entre les côtes (en nivellement général) du Diarha et le niveau de remplissage de ses bas-fonds.

Photo 1. L'outil Hauteur-Volume dans Surfer 14



La figure 6 montre le niveau de remplissage d'un réservoir quelconque, matérialisé par la couleur bleue (« *Negative volume (fill)* ») à la côte 75 m. La surface en bleu représente le volume de remplissage entre la surface définie par $Z=\text{constante}$ et celle définie par les courbes de niveaux et donc le volume de stockage des bas-fonds.

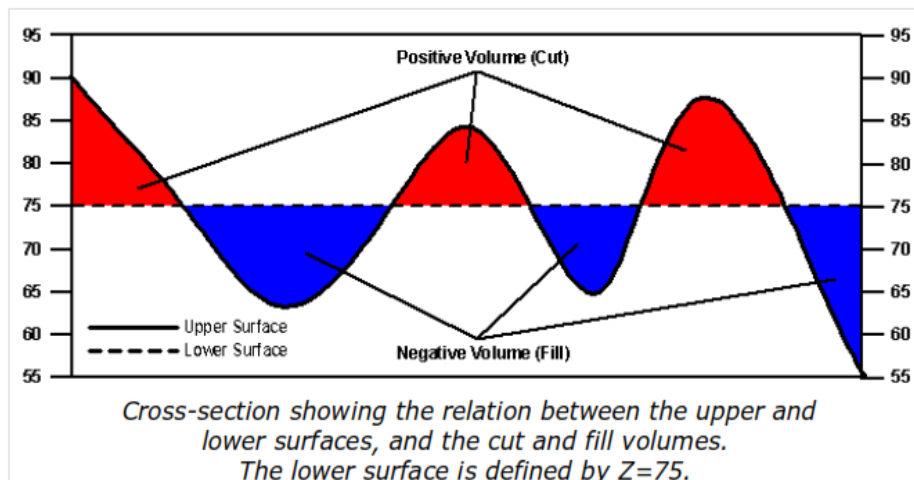


Figure 6. Relation Hauteur-Volume-Surface dans Surfer 14

3. Modélisation Pluie-Débit

Dans cette étude, deux modèles hydrologiques du RS Minerve (GR4J et SAC-SMA) ont été comparés. C'est le modèle qui reproduit le mieux les hydrogrammes observés pendant les phases de calage (1975-1992) et de validation (1998-2003), qui a été utilisé pour reconstituer les débits manquants du Diarha sur les périodes (1961-1974 ; 1993-1997 et 2004-2012), afin d'étendre la série des débits de 1961 à 2012. De surcroît, les paramètres de ce même modèle ont été utilisés pour simuler les débits futurs (horizon 2050) en vue d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin du Diarha. Les sorties de modèles climatiques utilisées pour cela proviennent de trois modèles climatiques régionaux (IPSL-CM5A-LR, INM-CM4, et GFDL-ESM2G). Ces données sont issues d'AMMA-2050. Les Débits Caractéristiques de Crues (DCC) et d'Etiages (DCE) ont été calculés afin de caractériser leurs évolutions dans les scénarios climatiques projetés à l'horizon 2050.

3.1. Le Modèle RS Minerve

RS Minerve est un logiciel de modélisation hydrologique et hydraulique développé par le Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) et Hydro Cosmos SA, en collaboration avec l'Université Polytechnique de Valence, Hydro10 et l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Il permet de simuler la production et le transfert des débits sur un bassin versant complexe selon un schéma conceptuel semi-distribué et par une approche orientée-objet. Il intègre plusieurs modèles pluie-débit tels que GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J et HBV.

Le module RS Expert du logiciel permet une évaluation approfondie des résultats de la simulation. L'étalonnage automatique avec différents algorithmes tels que le *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA)* (Duan Q., Sorooshian, S., et Gupta, V. K. 1994), *Uniform Adaptive Monte Carlo* (Gilks W. R., Roberts G. O., et Sahu S. K., 1998 ; Liu J.S., 2001), et la méthode du *Coupled Latin Hypercube with Rosenbrock* (Rosenbrock H.H., 1960), calcule le meilleur ensemble de paramètres hydrologiques en fonction d'une Fonction Objective (OF) définie par l'utilisateur. Pour la propagation fluviale, des schémas Lag-Time, Kinematic-Wave, Muskingum-Cunge et St-Venant sont mis en œuvre. En outre, le module « *scenario-simulation* » offre la possibilité de simuler des scénarios météorologiques ou plusieurs ensembles de paramètres pour étudier la variabilité et la sensibilité des résultats du modèle.

Les deux modèles du RS Minerve (GR4J et SAC-SMA) testés dans cette étude sont calibrés en mode conceptuel semi distribué avec la possibilité de déterminer la contribution de chaque sous bassin au débit naturel du grand hydrosystème (Fig.7, 8). Ils nécessitent (i) une base de données météorologique spatiale (stations virtuelles) comprenant les pluies et les températures journalières des différentes stations climatiques ainsi que (ii) les couches vectorielles des bassins versants pour le calcul automatique de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle (ETP). À cet effet, le bassin du Diarha a été discrétisé dans l'environnement ArcMap afin de créer des Unités de Réponse Hydrologiques (HRU) dont les paramètres sont les suivants : la superficie, le centre de gravité (x, y, z) et la longueur du talweg principal de chaque HRU (Tab.2). À l'aide du module GIS de RS Minerve, les couches vectorielles des HRU ont été importées afin de faciliter leur conceptualisation ; et comme à chaque sous bassin est associée une station météorologique virtuelle (Fig.7, 8), les coordonnées des centres de gravité (x, y et z) ont été utilisées pour l'interpolation spatiale par la méthode des polygones de Thiessen (Roche M., 1963). Quant à l'ETP, il a été estimé à l'aide de la méthodologie proposée par Oudin L. (2006), laquelle est basée essentiellement sur l'utilisation des températures moyennes journalières et de la latitude de la zone d'étude.

Tableau 2. Paramètre des Unités de Réponse Hydrologiques.

HRU	Area [km²]	Longest Flowpath [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
Termessé	274.8	40300	741466	1375370	132
Niogola	159.3	28500	747162	1365570	174
Fangama	93.7	20600	756923	1369230	160
Bilèle	19.7	10080	742252	1390280	66
Diouguel	73.93	24180	758190	1379220	93
Dakately	44.03	12470	752031	1379030	107
Gokodou	14.43	8212	747620	1390750	74
Kéwé	44.42	12380	750577	1386850	92
Mbéma	31.57	10724	744745	1394010	62

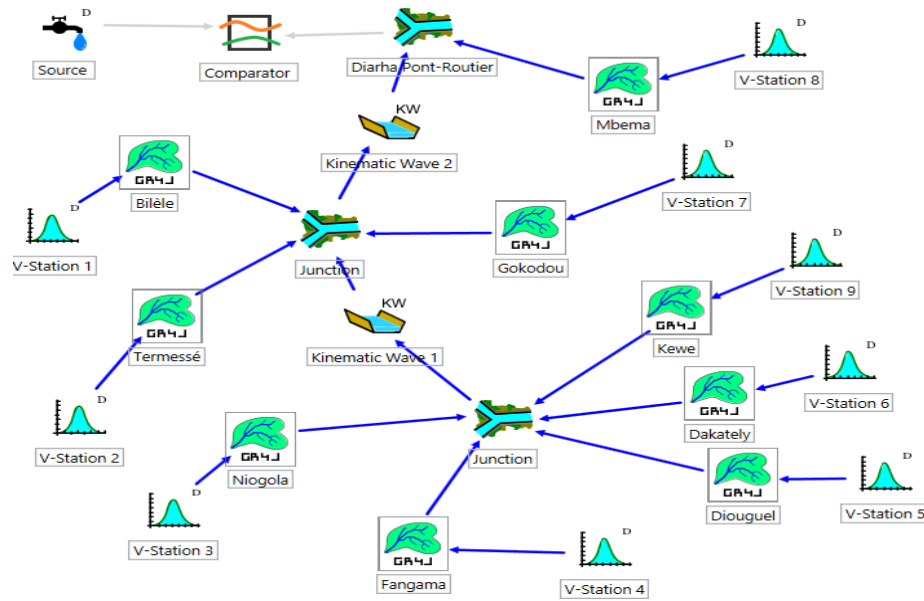


Figure 7. Topologie du modèle complet GR4J : production, transfert puis transport

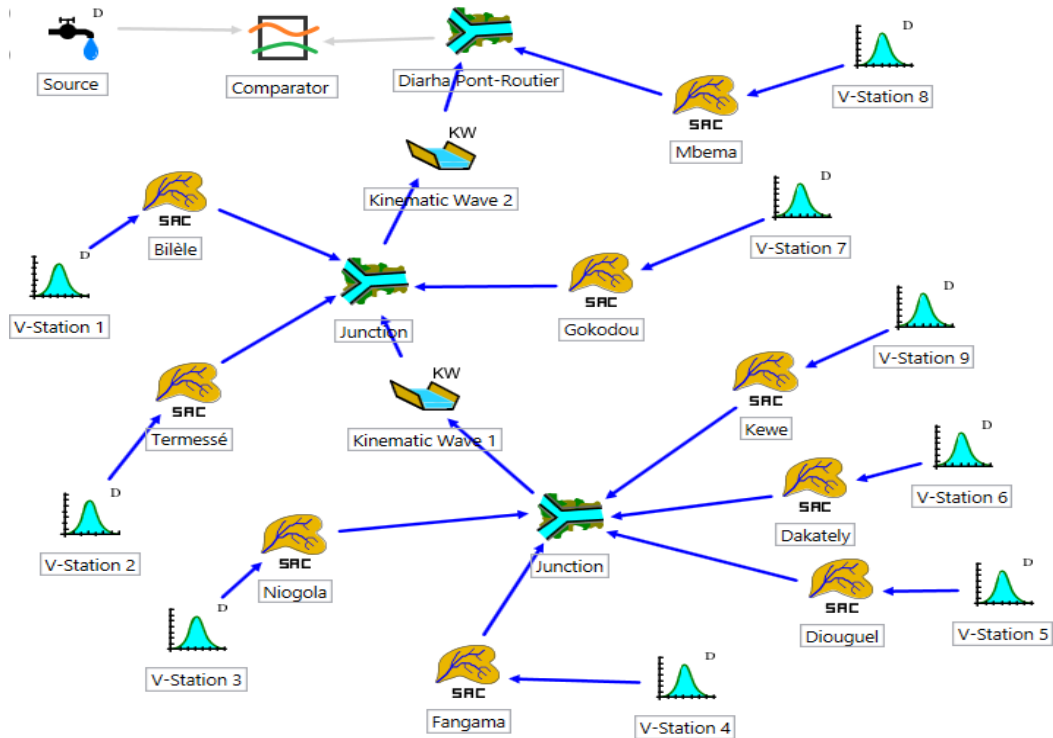


Figure 8. Topologie du modèle complet SAC-SMA : production, transfert puis transport

3.2. Optimisation des modèles hydrologiques

L'optimisation automatique des modèles est basée sur l'utilisation d'une fonction multicritère qui regroupe les critères de Nash, KGE' et R (Tab.3), pour éviter les biais dus à l'utilisation d'un seul critère (Nash).

Tableau 3. Indicateurs de performance

Criterion	Formula	Scale	Idea value
Nash (NSE)	$1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Xsim, t - Xref, t)^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (Xref, t - \bar{X}ref)^2}$	$-\infty$ to 1	1
Nash-ln	$1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Xsim, t) - \ln(Xref, t))^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Xref, t) - \ln(\bar{X}ref))^2}$	$-\infty$ to 1	1
Pearson (R)	$\frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Xsim, t - \bar{X}sim) \times (Xref, t - \bar{X}ref)}{\sqrt{\sum_{t=ti}^{tf} (Xsim, t - \bar{X}sim)^2 \times \sum_{t=ti}^{tf} (Xref, t - \bar{X}ref)^2}}$	-1 to 1	1
KGE' (modified KGE-statistic)	$1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$	0 to 1	1

Nash is the Nash-Sutcliffe coefficient; $X_{sim,t}$ is the simulated flow at time step t ; $X_{ref,t}$ is observed flow at time step t ; **KGE'** is modified KGE-statistic; **R** is correlation coefficient between simulated and reference flow; β is ratio between the mean of the simulated flows and the mean of reference ones; γ is variability ratio (ratio between the coefficient of variation of the simulated flows and the coefficient of variation of the reference ones).

La méthode du *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA)* a été utilisée pour l'étalonnage automatique des modèles. SCE-UA est une méthode d'optimisation globale (Duan Q., Sorooshian S., et Gupta V.K., 1992) qui repose sur la synthèse des meilleures caractéristiques de plusieurs algorithmes (Kan G., Liang K., Li J., *et al.* 2016) et sur l'utilisation d'opérations linéaires : la méthode simplex de Nelder J.A., et Mead R., (1965). La méthode a été conçue pour résoudre les problèmes rencontrés dans la calibration des modèles hydroclimatiques (Ajami K., Gupta N., Wagener H.T., *et al.* 2004 ; Muttill N., et Liong S.Y., 2004 ; Blasone R.-S., Madsen H., et Rosbjerg D., 2007) en l'occurrence les modèles conceptuels pluie-débit (modèles CRR). Elle a été récemment utilisée avec succès dans la gestion des ressources en eau des bassins versants (Zhu X., Wu J., et Wu J., 2006 ; Liu Y., 2009 ; Jeon J.-H., Park C.-G., et Engel B., 2014). SCE-UA est basé sur la synthèse de plusieurs approches : (i) combinaison d'approches probabiliste et déterministe, (ii) l'évolution systématique d'un « complexe » de points couvrant l'espace des paramètres, dans le sens d'une amélioration globale, (iii) le schéma d'évolution compétitif et (iv) le *complex Shuffling*. De nombreuses études utilisant différents modèles CRR, dont le modèle hydrologique (HYMOD), le modèle à six paramètres (SIX-PAR) et le modèle SAC-SMA (Duan Q., Sorooshian S., et Gupta V.K., 1992 ; Sorooshian S., Duan Q., et Gupta V. K., 1993 ; Eckhardt K., et Arnold J.G., 2001) ont montré que SCE-UA est un algorithme efficace, cohérent et flexible pour la calibration automatique des modèles environnementaux.

SCE-UA nécessite d'abord la définition d'une Fonction Objective (OF). L'optimisation se fait en fonction du nombre de critères objectifs sélectionnés et du nombre maximum d'itérations (MAXN) jusqu'à l'atteinte de la valeur optimale de OF. Ensuite, un tirage au sort de 7000 combinaisons des paramètres de chaque modèle a été effectué afin d'identifier les valeurs optimales. Enfin, un réglage local des paramètres, précédé de 295 itérations des fonctions de production et de transfert des modèles a été effectué. Ce processus permet de choisir les paramètres du modèle qui reflètent le mieux la relation pluie-débit.

4. Elaboration des différentes parties de la thèse

Cette phase de l'étude est l'élaboration des différents axes de la thèse qui sont scindés en huit chapitres :

- Les chapitres 1 et 2 portent sur la caractérisation physiographique du bassin du Diarha avec l'analyse des caractéristiques géologique, hydrogéologique, géomorphologique, biogéographique, morphométrique et structurale, lesquelles conditionnent fortement les modalités des écoulements.
- Le chapitre 3 traite des bas-fonds dans les sous bassins du Diarha avec un accent sur les caractéristiques morphométriques et les potentialités agro-pédologiques. Elle aboutit à une typologie des bas-fonds, élaborée en fonction des unités du paysage (géologie, pédologie, relief, morphométrie, végétation, etc.).
- Les chapitres 4 à 7 constituent le cœur de la thèse. Y sont abordés, le climat, sa trame, les apports en eau, et les implications hydrologique et écologique des changements climatiques dans le bassin versant du Diarha. La connaissance des nombreuses fluctuations du climat est un préalable, car du forçage climatique dépend la réponse hydrologique des bassins versants, laquelle conditionne à son tour les disponibilités en eau à l'échelle des bas-fonds. Après l'analyse du « faciès » des régimes hydrologique et climatique du bassin du Diarha, une typologie des bas-fonds a été établie en fonction de leur fonctionnement hydrologique.
- Le chapitre 8 porte sur la mise en valeur des ressources en eau des bas-fonds du Diarha. Y sont abordées, les formes d'usages, les contraintes de gestions des ressources en eau, les politiques et/ou réglementations de gestion et d'accès aux ressources (gouvernance locale) ainsi que les stratégies d'adaptation mises en place par les paysans.

**CHAPITRE I. GÉOLOGIE, HYDROGÉOLOGIE, GÉOMORPHOLOGIE,
MORPHOPÉDOLOGIE ET BIOGÉOGRAPHIE**

Introduction

L'étude géologique est importante à plus d'un titre. Elle détermine, avec le climat, la nature des roches et des sols correspondants et conditionne l'hydrogéologie en définissant les conditions d'existence et de réalimentation des nappes souterraines.

I.1. Contexte géologique du bassin du Diarha

L'histoire géologique du bassin versant du Diarha reflète celle de Kédougou et du continent africain, « pays de vieilles plateformes » où des formations sédimentaires très anciennes, traversées de roches effusives ont été fortement plissées, métamorphisées et injectées de roches granitiques, Michel P. (1973). Le bassin s'étend sur des formations géologiques complexes et diversifiées. Pendant le Cambrien inférieur (Infracambrien), le Cambrien supérieur et l'Ordovicien se sont déposés d'épaisses séries sédimentaires principalement gréseuses. Ces séries sédimentaires sont affectées par des plissements et traversées de venues doléritiques très épaisses. Ces grès et ces dolérites forment les principaux affleurements du bassin du Diarha.

I.1.1. Le socle Antécambrien

L'ensemble des formations géologiques rencontrées dans le bassin du Diarha sont attribuées au Birrimien. Ce dernier est divisé en deux périodes (Michel P., 1973) :

- Le Birrimien inférieur, composé de puissantes séries légèrement métamorphisées des schistes, quartzites et cipolins. Ces terrains se rencontrent surtout au nord et à l'ouest du bassin du Diarha dans les zones de Darsalam, Guémau, Djirigne, Koté et Bilèle. Ils renferment en outre d'intrusions granitiques qui s'observent dans les parties profondes des diaclases ou des failles et n'affleurent que si l'érosion a été suffisante. Leur formation est liée à l'orogénèse et peut se faire au cours de celle-ci (granite syntectonique), ou à la fin du cycle orogénique (granite post-tectonique) ou enfin se produire au cours de la dernière période d'une phase orogénique (granite tardi-orogénique) ;
- Le Birrimien supérieur composé de roches basiques appelées « roches vertes », dérivant d'anciens complexes volcano-sédimentaires : metabasites, méta-andésites, et amphibolites. Ils sont accompagnés de faciès sédimentaires tels que les tufs, grauweekes, jaspes et argilites. Ces roches vertes se rencontrent surtout au nord du bassin dans les localités de Mbéma et de Sokodou.

Ces terrains : schistes, quartzites, cipolins et roches basiques ont été plissés par une tectonique birrimienne de direction SSO-NNE.

Des séries sédimentaires essentiellement gréseuses se sont déposées pendant le Cambrien inférieur (Infracambrien), le Cambrien supérieur et l'Ordovicien. Ces couvertures gréseuses sont affectées par des plissements et traversées de venues doléritiques très épaisses.

I.1.2. La couverture du Paléozoïque

Les formations du paléozoïque présentent le plus souvent un faciès gréseux et occupent la majeure partie du bassin du Diarha. Les géologues subdivisent ces formations sédimentaires d'après les séquences pétrographiques en : Infracambrien, Cambrien inférieur, Cambrien supérieur et l'Ordovicien.

Les travaux de Camus H. et Debuissou J. (1964), Bassot J. (1966, 1969), et Michel P. (1973), nous permettent de distinguer les séries stratigraphiques suivantes :

- L'Infracambrien ou Cambrien inférieur

L'Infracambrien repose en discordance sur le Birrimien plissé et comprend : des grès quartzites, des calcaires gréseux, des pélites et schistes calcareux (Bassot J. 1969). Il est observé en affleurement au Sud du bassin du Diarha dans les localités de Parawol et de Bandani, le long du rebord de la falaise du Fouta Djallon. Ces terrains sont fortement diaclasés à la faveur d'accidents tectoniques ;

- Les terrains du Cambrien moyen et du Cambrien supérieur

Cette série essentiellement schisto-dolomique s'oppose aux autres formations paléozoïques à faciès surtout gréseux. Elle recouvre soit les niveaux du Cambrien inférieur, soit directement le socle antécambrien, lorsqu'ils ont été érodés. À sa base, se trouve des tillites constituées principalement de roches cristallines (Michel P. 1973).

Le Cambrien supérieur se répartit en deux séries d'affleurements dans le bassin du Diarha :

- la bande Cambrienne orientale, orientée SSO-NNE, qui affleurent largement au Sénégal oriental dans les localités de Djirigne, Ekess, Salémata et Edinn, au Nord du bassin du Diarha ;
- Et le Cambrien de la cuvette synclinale de Youkounkoun en Guinée, retrouvé à l'ouest des collines Bassaris.

Ces deux séries d'affleurements sont séparées par les reliefs des collines Bassaris.

- L'Ordovicien

Il est gréseux, des grés blancs qui affleurent surtout dans la partie guinéenne du bassin au niveau du prolongement des collines Bassaris en Guinée. Il forme les massifs de grés blancs de Banharé et de Dalaba, surmontés par des schistes à graptolithes datés du Gothlandien supérieur (Camus H., et Debuissou J., 1964). Dans le bassin versant du Diarha, il n'existe pas de dépôts paléozoïques postérieurs à l'Ordovicien.

- La série métamorphique de Bakel et des collines Bassaris

Elle est rangée par Bassot J. (1966) dans les formations birrimiennes. Dans le bassin du Diarha, la série de Bakel et des collines Bassaris est représentée par les formations métamorphiques des collines Bassaris, accompagnées de complexes granitiques, de roches vertes identiques à celles des formations birrimiennes et de roches basiques plus récentes. Ces roches vertes, éruptives, metabasites et méta-andésites sont accompagnées de faciès sédimentaires tels que les grauweekes, jaspes et argilites (Fig.9). Ce groupe de roches basiques s'observe tout au long de la limite entre les terrains métamorphiques des Bassaris et la bande falémienne orientale. L'ensemble forme un complexe volcano-sédimentaire, limité à l'Ouest par la série de Youkounkoun et à l'Est par la série de la Falémé notamment dans les localités de Neppen Diakha et Neppen Peul où dominent les pélites, les grauweekes et les dolérites, dans la partie sénégalaise du bassin versant du Diarha.

Dans la partie guinéenne, elle apparaît dans les localités de Nangami, Parawol, Barkéré et Bandani où affleurent des pélites interstratifiées de bancs de grés roses. Localement, on rencontre des grauweekes dans ces localités et des dolérites qui couvrent la falaise infracambrienne du Fouta Djallon et de Dindéfélou près de Neppen Diakha (Fig.9).

I.1.3. La tectonique post-ordovicienne

La tectonique cassante syn-orogénique du bassin versant du Diarha affecte la série cambro-ordovicienne et les terrains métamorphiques de la série de Bakel et des collines Bassaris. Elle agit dans le sens de la fissuration des roches saines (schistes, quartzites) en blocs séparés par les failles (Michel P., 1973). Bassot J. (1966) a souligné l'existence de nombreuses diaclases qui dénotent l'ampleur de la tectonique cassante. En conséquence cela favorise toutes les conditions d'une perméabilité interstitielle. D'ailleurs, la nature des roches, les quartzites surtout, se prêtent à ce type de déformation.

Dans l'ensemble, les formations géologiques rencontrées dans le bassin du Diarha, en particulier les grés, les schistes, les quartzites, les pélites et les dolérites sont d'une perméabilité

très faible du fait surtout du recouvrement latéritique et l'altération physico-chimique des roches qui finissent par se transformer en argiles.

I.2. Contexte hydrogéologique du bassin du Diarha

L'hydrogéologie est un facteur déterminant pour l'écoulement de surface car elle est liée à la nature de la roche qui renferme l'eau qui peut déterminer l'hydrologie de surface.

La classification hydrogéologique des grands ensembles d'un bassin selon la méthode de l'IRD par Dubreuil P., et Guiscafre J. (1971) permet de ranger les séries en quatre classes de roches dans le bassin du Diarha (Fig.9). Cette classification se fonde sur la structure physique de la roche et de son état de fissuration. Ainsi, on distingue les classes suivantes :

- P3 : alternance de roches imperméables et de roches perméables comportant des argiles (jaspes rouges, grauweekes, pélites, grés schisteux et argilites) ;
- P6 : désigne le groupe de roches cristallines ou cristallophylliennes susceptibles de renfermer des niveaux aquifères avec des faciès schisteux et quartziques dominant ;
- P7 : forme le groupe de roches recristallisées totalement imperméables avec des complexes volcano-sédimentaires (complexes granitiques, roches vertes, andésites et dolérites ;
- S2 : comporte des cuirasses latéritiques ainsi que des alluvions de sables et d'argiles.

L'analyse de la figure 9 révèle que le Centre du bassin versant du Diarha est dominé par la couverture latéritique (classe S2). Par contre, dans la partie guinéenne du bassin, notamment dans les localités de Nangami, Parawol, Sabéré-Kassinian, Niogola, Sintiou, Fangama et Termessé, les classes de roches reconnues concernent les classes P6 et P7, considérées comme imperméables.

Les formations P3 et S2 se caractérisent par une perméabilité relativement faible. Cette faible perméabilité a été confirmée par Martin A. (1962) qui a fait l'inventaire des ressources en eau (souterrain) à partir de deux puits situés à Neppen Diakha et Neppen Peulh. Ces deux puits situés au pied de la falaise du Fouta Djallon ont un débit nul malgré leur position hydrogéologique à priori favorable. Néanmoins, l'inventaire fait par Camus H., et Debuissou J. (1964) permet de distinguer plusieurs nappes à des endroits très localisés, dont la présence est liée à la tectonique et à l'altération physico-chimique des roches. Il s'agit des nappes de :

- Salémata et Nangar où l'insertion de bancs de quartz parmi les schistes altérés crée des voies de percolation ;

- Etiolo : les nombreuses failles qui affectent les quartzites ont été à l'origine de la naissance de sources dont le débit est estimé à $1\text{m}^3/\text{h}$;
- Dar Salam, situé en bordure du Diarha ;
- Enfin Koté et Ebarack où la ressource en eau est en faible quantité et de qualité douteuse.

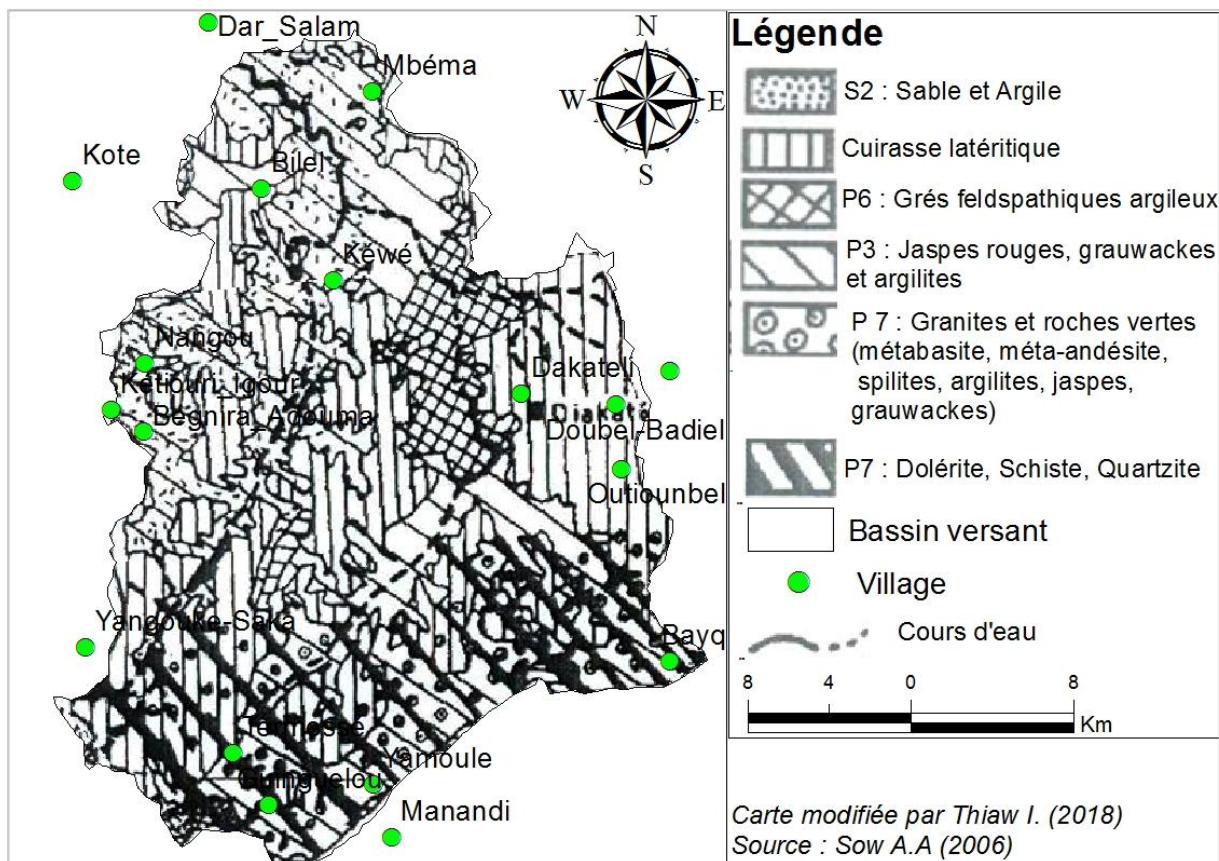


Figure 9. Esquisse hydrogéologique du bassin versant du Diarha

Le modèle (Fig.10), repris dans un contexte hydrogéologique et climatique similaire à celui du bassin du Diarha, met en relief un système bicouche : des altérites jouant le rôle d'un horizon capacitif (susceptible d'accueillir des quantités d'eau importantes) mais peu transmissif reposent sur un horizon diaclasé constituant un horizon transmissif mais le plus souvent peu capacitif.

Ce modèle est nuancé par la nature lithologique et hydrodynamique des altérites. La gamme lithologique s'étend d'entités à dominante sableuse (arène granitique) à des altérites à dominante argileuse pour les roches magmatiques du socle précambrien. Le modèle concorde avec les observations faites sur le terrain par la Direction de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (DGPPE, 2015) qui montrent que la majorité des puits creusés dans la région de Kédougou s'arrêtent à la base de la zone altérée. Les roches diaclasées investiguées par la méthode géophysique présente un potentiel non négligeable capté par les forages. Toutefois, il

convient de souligner que la principale contrainte liée à l'utilisation de ce potentiel souterrain se résume à celle de son exploitation. Il est impossible de creuser dans les schistes et les quartzites en l'absence de moyens d'exploitation adéquats. Dès lors, l'intervention de l'Etat et des ONG sur ce plan serait bien vue par les populations locales qui font face à des pénuries d'eau périodiques très contraignantes.

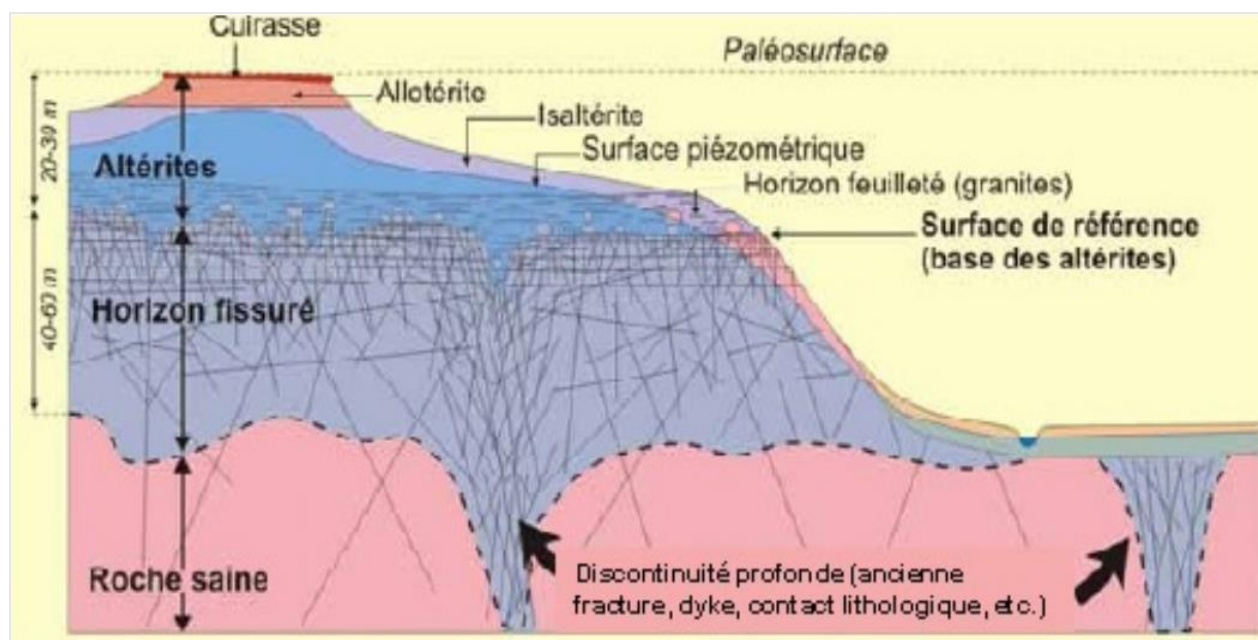


Figure 10. Schéma conceptuel de configuration d'une aquifère du socle (Source : DGPRE, 2015)

I.3. Caractéristiques Géomorphologiques

L'évolution géomorphologique du bassin versant du Diarha a été profondément influencée par l'évolution paléogéographique qui a été marquée par d'importantes variations climatiques et des oscillations du niveau marin. Cette évolution se résume essentiellement à :

- une phase de régression à la fin du Paléozoïque ;
- une phase de plissement parfois de grande envergure (nappe de charriage) accompagnée de cassures à la fin de l'Ordovicien et suivie d'une importante crise d'érosion qui a arasé les reliefs ;
- et l'intervention d'une nouvelle phase de transgression dite Lutétienne au Tertiaire caractérisée par l'ampleur des dépôts sédimentaires.

Ces mouvements épeirogéniques se sont soldés par la succession dans le paysage de reliefs résiduels (collines, buttes témoins, inselbergs) surtout dans les localités de Salémata, Etiolo, Dakately, Dar Salam et Kéwé ; de glacis étagés à pente faible ou nulle et de dépressions. L'alternance de phases sèches durant lesquelles les surfaces sont aplanies et de phases humides,

favorables à la mobilisation du fer a présidé à la formation sur les glacis d'une cuirasse épaisse et assez étendue. En outre, Michel P. (1973) a noté l'extension du moyen glacis dans le bassin versant du Diarha, glacis sur lequel s'est développé le village d'Etiolo.

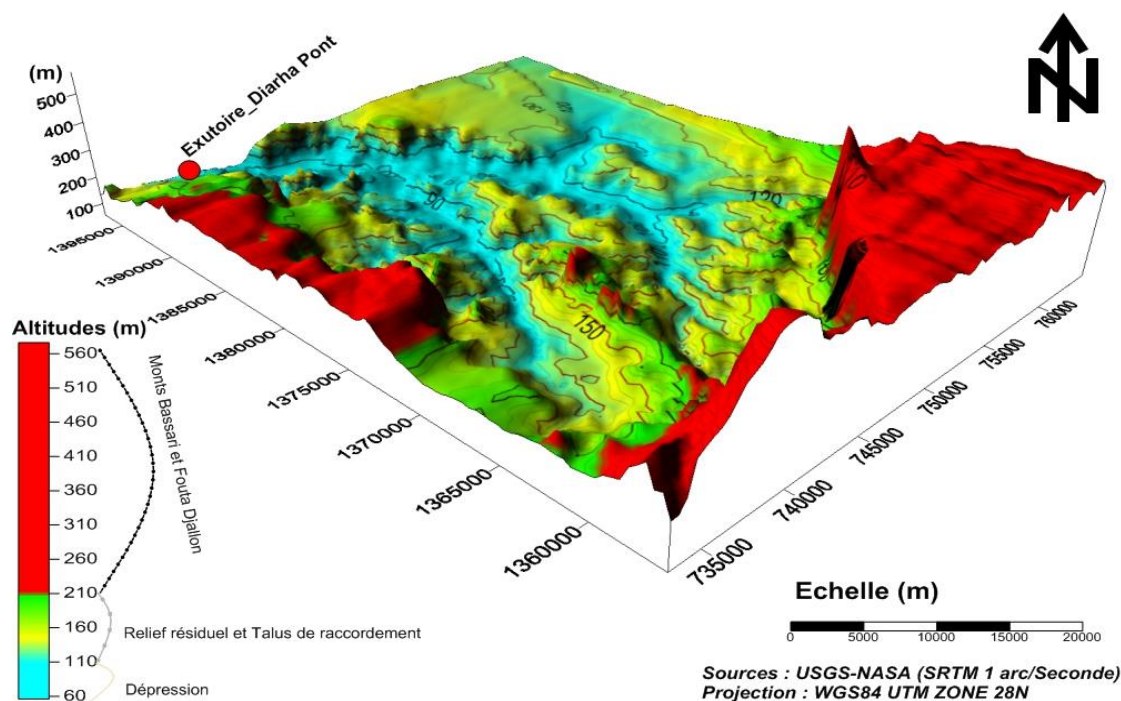


Figure 11. Les grandes unités géomorphologiques du bassin versant du Diarha

Dans le haut bassin du Diarha dominant des plateaux étagés et disséqués correspondant au prolongement des monts Bassaris en Guinée (haut et moyen glacis), notamment dans les localités de Sabéré-Kassinian, Niogola, Termessé, Lesséré, Fangama, et Bandani. Les altitudes y varient entre 210 et 576 m (Fig.11). Ces hauts reliefs du bassin se rapportent aux couches monoclinales de l'Infracambrien où des grès quartzites alternent avec des pélites et des dolérites altérés et déblayés par l'érosion différentielle (l'érosion mécanique très souvent).

Entre Salémata et Dakately dominant des buttes témoins d'altitudes variant entre 100 et 210 m. Ces reliefs résiduels apparaissent comme des collines isolées ou des portions de plateaux épargnées par l'érosion. En outre, la dispersion des éboulis sur les flancs des reliefs engendre le phénomène de ravinement.

En contrebas de ces reliefs se sont formés, au cours du Quaternaire, des glacis étagés et recouverts par des cuirasses ferrugineuses ou latéritiques. Ces terrains cuirassés ont très souvent subi des retouches. La surface plane des cuirasses (bas glacis) a été partiellement érodée par la fragmentation de la cuirasse et les incisions du Diarha et de ses affluents. C'est ce qui explique les vallonnements et les ondulations de la topographie du bassin (Fig.11).

Les profils en long et en travers du bassin versant du Diarha mettent en exergue une alternance de replats et de vallées encaissées, entaillés dans les formations quartziques et doléritiques du socle précambrien. Les vallées sont séparées par des interfluvies (crêtes) qui peuvent atteindre jusqu'à 160 m d'altitude selon le secteur. Ces unités géomorphologiques sont liées généralement à l'influence de la tectonique cassante et de l'érosion différentielle ainsi que l'érosion régressive des cours d'eau. Or, les profils des vallées supérieures et inférieures montrent des ruptures de pente qui peuvent s'expliquer, soit par des confluences qui accroissent la puissance érosive du cours d'eau, soit par un contact lithologique ou un abaissement structural du niveau de base. À ce propos, Schumm S.A., Dumont J.F et Holbrook J.F. (2000) montrent que l'abaissement structural du niveau de base engendre une érosion régressive, souvent marquée par une rupture de pente, si l'ajustement morphologique du lit est rendu difficile par le fort encaissement des vallées.

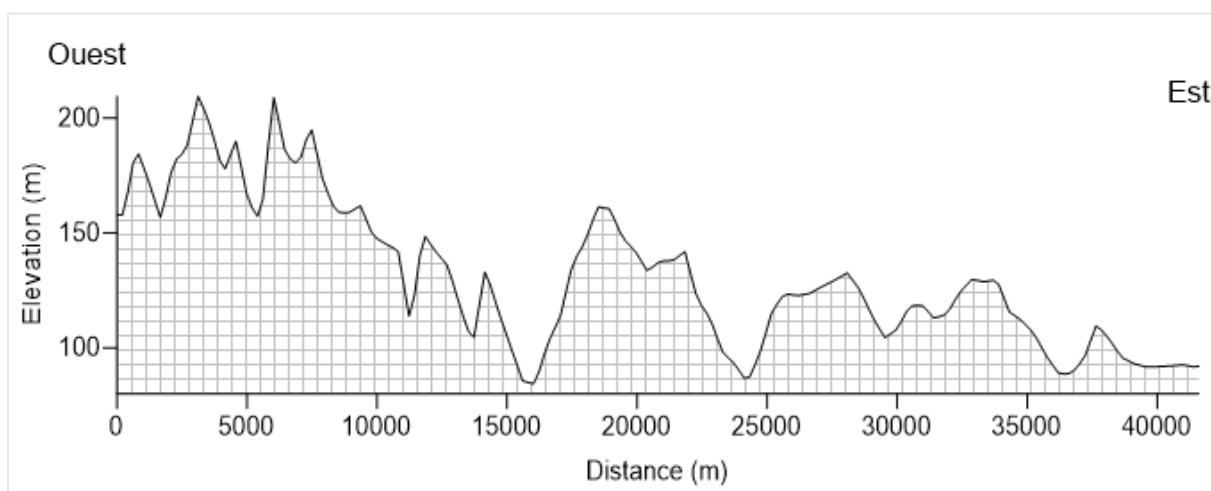


Figure 11a : Profil en travers du bassin versant du Diarha

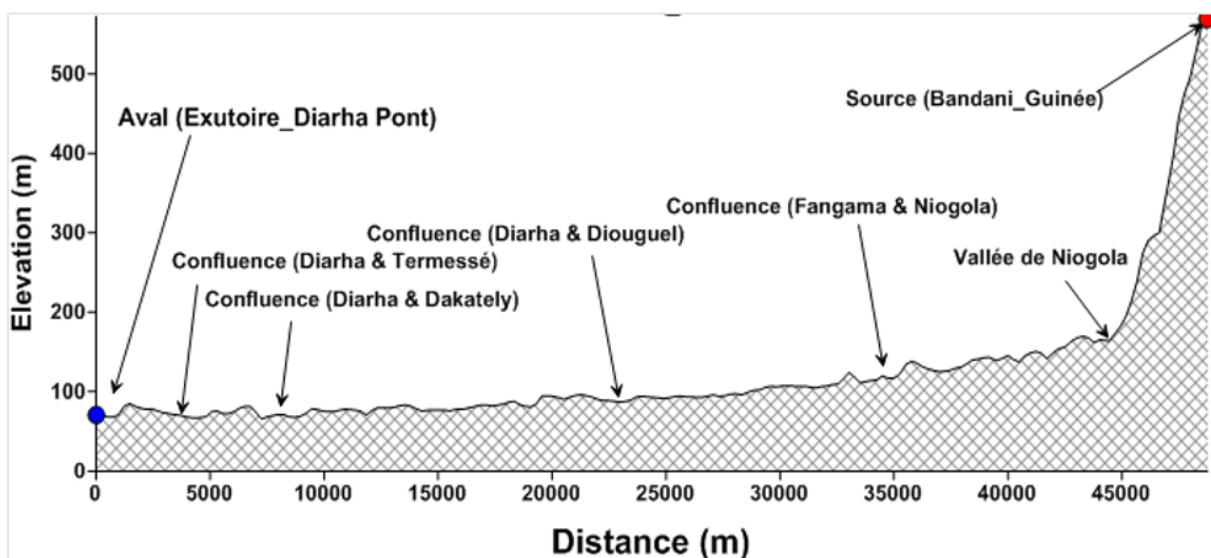


Figure 11b : Profil en long du bassin du bassin versant du Diarha

Le paysage géomorphologique du bassin versant du Diarha présente des aspects assez hétérogènes. Il résulte d'une longue et complexe évolution marquée par des périodes de stabilités et d'instabilités structurales au terme desquelles se sont mises en place des formes variées : plateaux étagés, buttes témoins, glacis, vallées, etc. Pendant les « périodes de stabilités ont pu se former des sols très évolués, qui reflètent le milieu morphoclimatique. Dès que des changements sont survenus dans le système morphogénétique, ils se sont immédiatement répercutés sur les sols. En conséquence, l'ensemble de l'évolution géomorphologique oriente la pédogénèse dans une région donnée et permet de comprendre la répartition actuelle des sols » (Michel P., 1973).

I.4. Typologie des sols du bassin versant du Diarha

Les sols représentent les transformations de la partie superficielle de la lithosphère, surtout sous l'influence du milieu bioclimatique (Michel P., 1973). Support des activités agricoles, leur formation dépend du substrat géologique, du modelé et du climat qui concourent à l'individualisation de différents types de sols.

La carte morphopédologique du bassin versant du Diarha, tracée à partir des feuilles de Kédougou (Chauvel A., 1967) et de Mali-Balaki (SENASOL, 1982), et des travaux de Maignien R. (1965) et Boufeev Y.B. (2006) met en évidence essentiellement quatre grandes familles de sols (Fig.12) : les sols hydromorphes, les régosols, les sols ferralitiques et les lithosols. La mise en place de ces sols obéit d'abord à la topographie ; ensuite, les facteurs climatiques, géomorphologiques et géologiques interviennent pour les différencier et commandent ainsi leur évolution et leur répartition géographique au sein du bassin. On distingue trois niveaux correspondant aux sols :

- des plateaux et des buttes résiduels,
- des versants, pentes et glacis d'épandage,
- et des bas-fonds.

I.4.1. Les sols des plateaux et des buttes résiduels

Ces types de sols occupent le glacis cuirassé du bassin du Diarha. Situés à des altitudes comprises entre 200 et 576 m, ils se sont développés sur les formations du socle birrimien. Les résultats de leur altération physico-chimique, largement dépendant du milieu bioclimatique, ont donné naissance à des régosols et lithosols sur ces unités morphologiques (Fig.12).

Les régosols sur matériau gravillonnaire et les sols peu évolués sur le même matériau, localisés généralement sur les collines topographiquement situées en position moyenne, sont recouverts de sols peu évolués d'apport vertiques sur matériau argileux gonflant.

Les régosols sur matériau argileux d'altération occupent les collines les moins élevées qui ne dépassent rarement 200 m dans les collines Bassaris. Ils se retrouvent à l'Est du bassin du Diarha, dans les localités de Diouguel et d'Outiounbel (Fig.12).

Les lithosols sur cuirasse sont réduits aux ruptures de pente où la cuirasse affleure en corniche. Ils ont les mêmes caractéristiques que les lithosols sur quartzites qui affleurent sur les collines de grès feldspathiques argileux organisées autour de Dakately. La cuirasse y est fortement démantelée, ce qui favorise la mise en place de sols peu évolués d'érosion sur matériau de démantèlement de cuirasse.

L'association régosols-lithosols est enrichie, plus au sud du bassin du Diarha, par des sols à caractères ferralitiques et de sols peu évolués. Ils apparaissent dans la partie guinéenne du bassin notamment dans les localités de Sabere Kassian, Niogola, Yangouke-Saka et Termessé. Dans cette partie du bassin, qui correspond au prolongement des collines Bassaris en Guinée (altitudes comprises entre 300 et 576 m), on retrouve également des associations de sols squelettiques d'affleurement de cuirasses anciennes, lithiques sur cuirasse et d'éboulis sur cuirasse (Fig.12).

I.4.2. Les sols des versants, pentes et glacis d'épandage

Les versants du bassin du Diarha sont recouverts de sols peu évolués d'apport hydromorphes sur matériau gravillonnaire ou d'association de sols ferralitiques et de sols hydromorphes. Dans les secteurs granitiques du bassin du Diarha (Dakately, Diouguel), des jaspes rouges, argilites et grauweekes (Bakaouka, Ngoppou et Bilèle), les sols peu évolués organiques sur arènes granitiques graveleuses dominent sur les basses pentes, tandis que les lithosols sur cuirasse occupent les parties hautes des versants (Fig.12).

Dans les localités de Yamoule, Bayq et Parawol, à l'extrême sud du bassin du Diarha, on retrouve des cuirasses de pentes et des éboulis de cuirasse en contrebas des glacis d'épandage (Fig.12). Ces types de sols présentent de faibles valeurs agronomiques car le risque de détachement de matériaux y est important : l'érosion hydrique est intense par concentration du ruissellement.

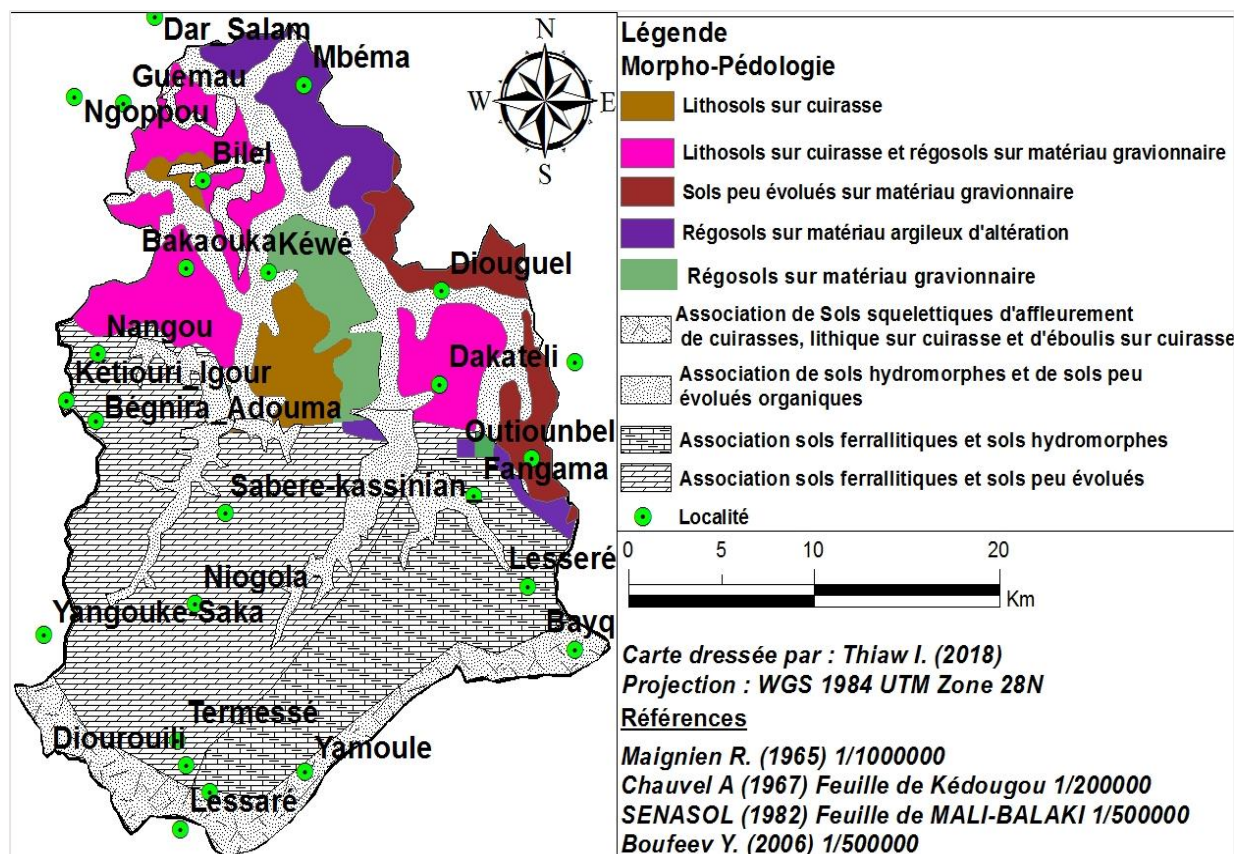


Figure 12. Morphopédologie du bassin versant du Diarha.

I.4.3. Les sols des bas-fonds

La morphologie des bas-fonds privilégie le ruissellement diffus qui entraîne en contrebas des versants des particules limoneuse, argileuse et même sableuse. Il se forme alors dans ces unités morphologiques des terrasses colluvio-alluviales. Dans les bas-fonds du Diarha, on distingue généralement deux types de sols correspondant aux sols des bas-fonds : les sols peu évolués d'apports et les sols alluviaux (Cf. Fig.12).

I.4.3.1. Les sols alluviaux

Les sols alluviaux sont localisés le long du Diarha et de ses affluents. Ce sont des sols hydromorphes minéraux à pseudo-gley de surface ou d'ensemble caractérisés par « des phénomènes de réduction ou de ségrégation locale du fer liés à une saturation temporaire ou permanente de l'eau provoquant un déficit en oxygène [...] la formation d'une nappe temporaire perchée d'origine fluviale [...] provoquant la réoxydation du fer en taches et concrétions quand la nappe disparaît ». (Duchauffour P., 1965, cité par Thioubou A., 1995). Les observations les plus récentes sur les caractéristiques physico-chimiques des sols de bas-

fonds ont été faites par Thioubou A. (1995). Les résultats qu'elle a obtenus sont consignés dans le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4. Caractéristiques physico-chimiques des sols de bas-fonds (Thioubou A., 1995)

Types de sols	Sols alluviaux			Vertisols				Sols gravillonnaires		
Horizons	A	B	C	A	B	C	D	A	B	C
Profondeurs (cm)	0-30	30-70	70-130	0-17	17-24	24-64	64-100	0-23	23-59	59-120
Argile %	30.4	52.7	45.7	28.5	17.9	36.2	36.1	16.9	9.7	15.8
Limon %	26.2	31.5	39	43.3	35.5	39.1	47.5	25.5	17.6	24.3
Sable %	42.5	19.1	21.5	30.1	49.9	27.6	20.3	58.5	73.7	60.5
Coef. Humidité	1.032	1.056	1.07	1.043	1.035	1.048	1.047	1.024	1.029	1.023
Azote total	2.86			0.52				1.93		
Capacité échange	28.29			34.34				20.73		
Ca	19.83			20.57				13.8		
Mg	7.81			13.73				5.05		
Na	0.44			0.09				0.05		
K	0.44			0.2				0.21		
Carbone	3.3			0.78				1.98		
% Mat. Organique	5.7			1.3				3.4		

Dans l'ensemble, les sols alluviaux sont des sols à texture fine argilo-limoneuse et argilo-sableuse. L'examen du tableau 4 montre que le premier horizon est constitué de 30.4% d'argiles, 26.2% de limons, tandis que les sables représentent 42.5%. Dans l'horizon B, ils représentent respectivement 52.7%, 31.5% et 19.1%. Même jusqu'à 130 cm de profondeur, les proportions d'argiles, de limons et de sables sont élevées. Ceci est lié sans doute aux apports annuels de sédiments fins durant la phase d'inondation.

Du point de vue chimique, les sols alluviaux sont riches en éléments nutritifs (azote, phosphate, matières organiques, calcium...). En plus, leur localisation au fond des bas-fonds, ainsi que leur bonne profondeur (130 cm) en font des zones à fort potentiel rizicole.

I.4.3.2. Les sols peu évolués d'apport

Les sols peu évolués d'apport ont des caractères hydromorphes et se forment généralement dans les régions où prédominent les roches basiques d'âge paléozoïque. Ils résultent d'un processus d'accumulation dans les milieux confinés de sédiments provenant de l'érosion des versants. Les sols peu évolués d'apports se confondent aux sols hydromorphes à pseudo-gley. On en distingue deux types :

- Les sols hydromorphes à pseudo-gley vertiques sur matériau argileux gonflant,
- Les sols hydromorphes à pseudo-gley sur matériau gravillonnaire.

I.4.3.2.1. Les sols hydromorphes à pseudo-gley vertiques sur matériau argileux gonflant

Ils connaissent leur plus grande extension dans les bas-fonds de Termessé, Niogola et Diouguel (Cf. Fig.12). Les sols vertiques sont imperméables en raison de leur forte teneur en argiles et en limons. Ils sont marqués par une alternance de périodes humides et de périodes sèches bien tranchées. Les variations d'imbibition et de dessiccation leur confèrent des caractères particuliers. En saison des pluies, les argiles montmorillonites se gorgent d'eau et deviennent ainsi lourds et difficiles à travailler surtout avec des instruments aratoires de types archaïques (charrue, houe, daba...). Par contre, en saison sèche, ils se rétractent et se crevassent par un réseau de fentes de dessiccation souvent profonde et deviennent pratiquement inapte à l'agriculture.

Photo 2. Sols vertiques de la vallée de Diouguel



Cliché THIAW, Décembre 2019

I.4.3.2.2. Les sols hydromorphes à pseudo-gley sur matériau gravillonnaire

Ces types de sols se retrouvent dans la partie haute des bas-fonds où ils reçoivent des gravillons ferrugineux provenant du démantèlement des cuirasses sus/sous-jacentes. Ce sont des sols assez perméables et d'un potentiel agronomique acceptable (Tab.4). Ils sont réservés à la culture de l'arachide.

En somme, les sols des bas-fonds du Diarha sont essentiellement d'apport, donc très vulnérables à l'érosion hydrique qui entraîne surtout leur ensablement. En plus, les matériaux

imperméables tels que les argiles, limons fins et grossiers influencent sensiblement le ruissellement et à un niveau plus perceptible, la distribution de la végétation.

I.5. Caractéristiques Biogéographiques

Il s'agit de la végétation qui joue un rôle fondamental dans l'hydrologie d'un cours d'eau. Sa distribution a une influence directe sur l'écoulement fluvial et les facteurs orographiques et climatiques. Son efficacité hydrologique dépend d'une notion fondamentale en hydrologie de surface : celle de la couverture végétale. Cette dernière agit sur le cycle de l'eau par sa biomasse aérienne qui intercepte une partie des précipitations dont l'intensité dépend de la densité du couvert végétal ; et, par son système racinaire qui, selon son importance aussi, entretient et meuble les berges des cours d'eau et joue un rôle déterminant de protection contre l'érosion des eaux de ruissellement et de soutien des débits d'étiage. Or, la détermination des superficies occupées par la végétation est difficile car les documents cartographiques les mentionnant sont rares. La télédétection satellitaire trouve ici une application particulièrement efficace.

Dans cette étude, nous avons utilisé une image Google Earth de 5 m de résolution (Fig.13) pour déterminer les classes d'occupation des sols à l'aide du logiciel eCognition. La haute résolution de l'image satellite, couplée à une bonne connaissance de l'aire d'étude nous a orienté vers une méthode de classification semi-automatique, dite de maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood*). La démarche consiste, après prétraitement de l'image (corrections géométrique et radiométrique liées aux variations géométriques Terre-capteur), à regrouper les pixels ayant les mêmes signatures spectrales dans une seule classe et de l'attribuer le type d'unité d'occupation du sol correspondant. La description et la séparation des unités cartographiées tiennent compte d'abord de leurs caractéristiques spectrales (structure/texture, forme, tonalité et distribution spatiale), ensuite d'une bonne connaissance du terrain et enfin de la documentation existante sur le type de milieu.

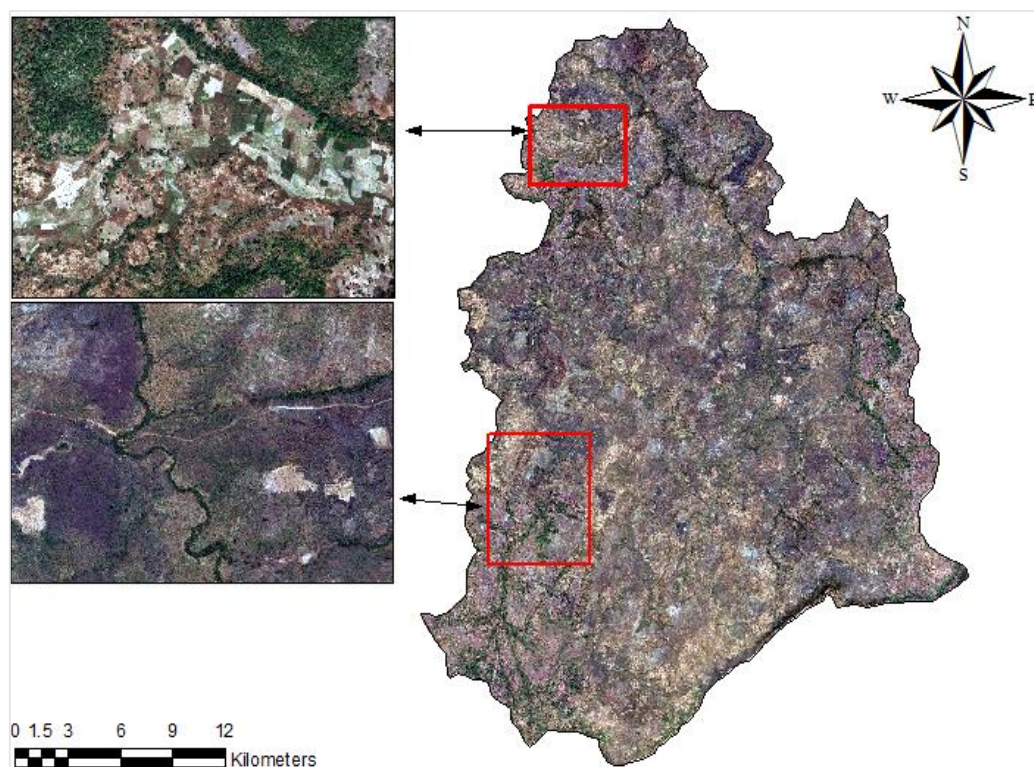


Figure 13. Image Google Earth de 2018 couvrant l'aire d'étude.

Suite à une classification orientée-objet, six (6) classes d'occupation du sol ont été identifiées (Fig.14). Il s'agit de la (i) forêt galerie, des (ii) bas-fonds non-exploités, la (iii) cuirasse latéritique, (iv) l'eau, (v) la savane arborée et (vi) les zones agricoles.

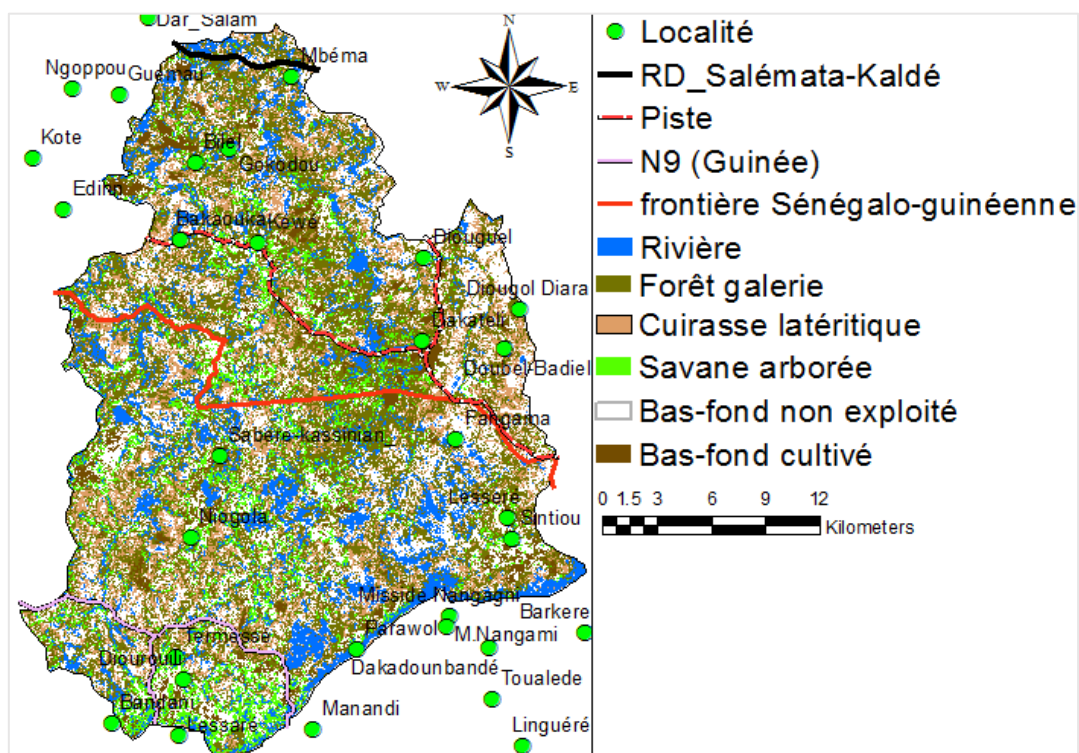
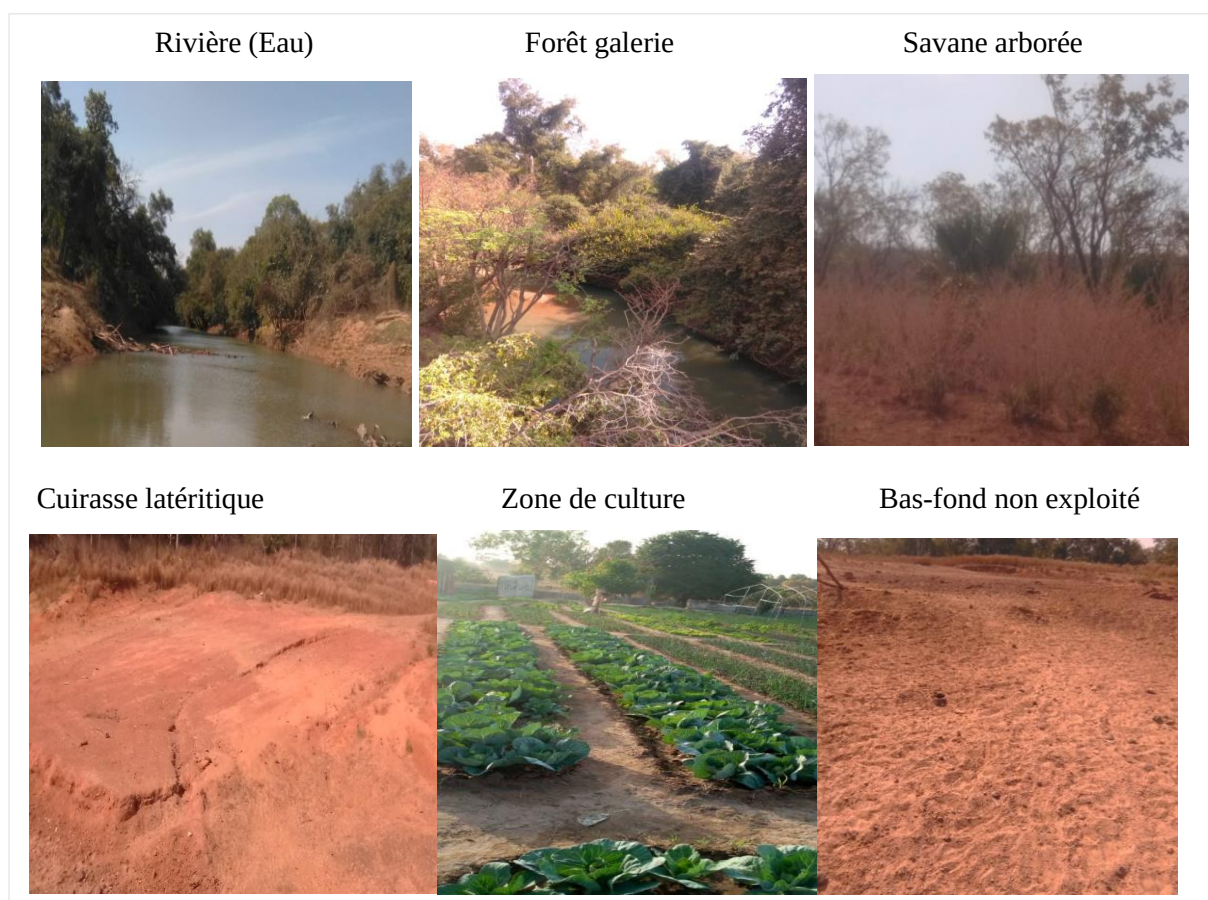


Figure 14. Bassin du Diarha – Carte d'occupation des sols.

Photo 3. Unités paysagiques identifiées (vue au Sol).



Cliché THIAW, Décembre 2019

La figure15 montre la part en valeur relative de chaque unité d'occupation du sol dans la superficie totale du bassin. La couverture végétale occupe une superficie totale de 318 km², soit 42% de la superficie du bassin du Diarha. La forêt galerie est la formation la plus répandue avec 73% de la couverture végétale et 31% de la superficie du bassin. Elle borde les berges du Diarha et de ses affluents d'amont en aval. Cette formation est suivie par la savane arborée qui est éparpillée un peu partout dans le bassin, couvre 27% de la couverture végétale et 11% de la superficie du bassin. On y rencontre des espèces guinéennes telles l'*Antiaris africana*, le *Daniellia oliveri* (Santan), le *Khaya senegalensis* et des espèces soudaniennes comme le *Vitellaria paradoxa* (Karité), le *Borassus flabellifer*, l'*Oxytenanthera abyssinica* (Bambou) et le *Saba senegalensis* (madd). Cependant, le paysage végétal du bassin est largement dégradé par les activités humaines et ses corolaires (défrichage, surpâturage, feux de brousse...), et le fléchissement de la pluviosité sur la période 1968-1993 (Thiaw I., 2017).

Photo 4. Défrichage et feux de brousse : Quel avenir face à cette menace écologique ?



Cliché THIAW, Décembre 2019

La cuirasse latéritique est localisée généralement sur les versants (glacis cuirassé) et en contrebas des glacis d'épandage. Elle occupe 14 % de la superficie totale du bassin.

Les bas-fonds occupent une superficie totale de 252 km² soit 33% du bassin du Diarha. Ces zones, pourtant réputées pour leurs fortes valeurs hydrologique, agronomique et pastorale, sont très faiblement exploitées : seulement 14% de leur superficie est mis en culture (Fig.15).

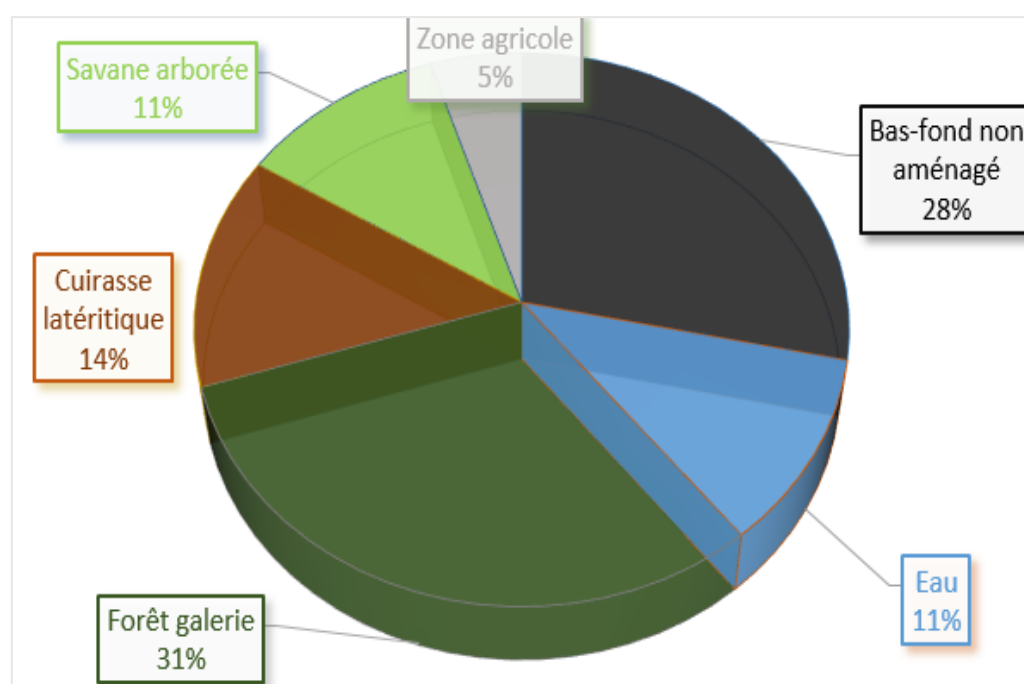


Figure 15. Bassin du Diarha - Pourcentages des unités d'occupation du sol identifiées.

Conclusion

Le bassin versant du Diarha est couvert par quatre grandes familles de sols que sont : les sols hydromorphes, les régosols, les sols ferralitiques et les lithosols. Leur mise en place obéit d'abord à la topographie ; ensuite, les facteurs climatiques, géomorphologiques et géologiques interviennent pour les différencier et commandent ainsi leur évolution et leur répartition géographique au sein du bassin. Ces sols résultent d'un long processus d'altération physico-chimique des formations infracambrienne et cambrienne du socle qui sont réputées pour leur fragilité et leur perméabilité très faible. Ils supportent, en fonction du milieu bioclimatique et de la topographie, des formations végétales de types forêts galerie et de savanes arborés ou boisées qui, comme on l'a vu, sont fortement affectées par l'évolution climatique et les activités humaines telles le défrichage et les feux de brousse récurrents.

Ces variables de contrôle des modalités des écoulements auront sans doute des conséquences sur le fonctionnement hydrologique du Diarha et de ses sous bassins. Mais, encore faudrait-il analyser les caractéristiques morphostructurales (relief et système de pentes, morphométrie...) pour mieux appréhender la dynamique hydrologique au sein des bassins versants, en l'occurrence la vitesse de propagation des flux d'amont en aval et les aires de drainage correspondantes ?

CHAPITRE II. CARACTERISTIQUES OROHYDROGRAPHIQUES DU BASSIN DU DIARHA

Introduction

Dans l'étude d'un bassin versant, la connaissance de la distribution spatiale des Unités de Réponse Hydrologiques (HRU) est fondamentale pour la quantification des écoulements de surface. Fort heureusement, le développement de la technologie spatiale et l'émergence des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et la Télédétection ont permis une meilleure connaissance du cycle hydrologique par l'utilisation des images satellitaires. Ces derniers ont facilité la représentation de la topographie d'une zone par le biais des Modèles Numériques de Terrain (MNT), mais aussi la cartographie de l'occupation du sol, grâce aux données fournies par différents capteurs satellitaires.

II.1. Caractéristiques Morphométriques

Les paramètres morphostructuraux (relief et son système de pente) et géométriques (surface, périmètre, indice de pente...) d'un bassin versant influent largement sur la vitesse et l'intensité de sa réaction face à une sollicitation des précipitations. Ces données morphométriques sont issues de la mise en place de la structure géologique et géomorphologique et conditionnent les modalités de l'écoulement du bassin.

II.1.1. Caractéristiques structurales du bassin versant du Diarha

Ce sont les divers paysages d'un bassin versant, des formes de relief créées par l'évolution géologique et géomorphologique qui influencent l'écoulement. Ces formes de relief agissent par leur masse et les pentes sur l'écoulement des eaux. C'est le cadre morphostructural qui détermine le tracé du réseau hydrographique, l'existence de seuils de niveaux durs, de chutes et aussi la hiérarchisation du réseau hydrographique (Sow A.A., 2006).

II.1.1.1. Le Relief du bassin

Le relief et son système de pentes déterminent l'aptitude des terrains à l'écoulement. Ils représentent les différentes classes d'altitudes du bassin et influent largement sur le comportement hydrologique du bassin et sur la vitesse de l'eau d'amont en aval.

La lecture de la figure16 révèle trois unités morphologiques : plateaux, talus de raccordement et dépressions. Les parties Nord-ouest et Sud du bassin apparaissent comme des zones potentielles de naissance des écoulements de surface. Elles correspondent généralement aux monts Bassaris et aux contreforts méridionaux du massif du Fouta Djallon. Les altitudes y

varient entre 160 et 580 m. Alors que la partie centrale du bassin correspond à une zone d'accumulation des eaux de ruissellement.

Tableau 5. Morphométrie de la topographie du bassin

Alt. Maxi (m)	Alt. Min (m)	Quartile 25 % (m)	Quartile 50 % (m)	Quartile 75 % (m)	Ip moy m/km	ΔH (m)
576	55	175.5	296	416.5	18.9	521

Dans l'ensemble, le relief change de forme du Sud vers le Nord. Les falaises deviennent de moins en moins marquées, les altitudes de plus en plus faibles. Elles passent de 576 m à Bandani, au Sud de Termessé, à 55 m à la station du Diarha au pont routier : l'écoulement suit le sens Sud-Nord.

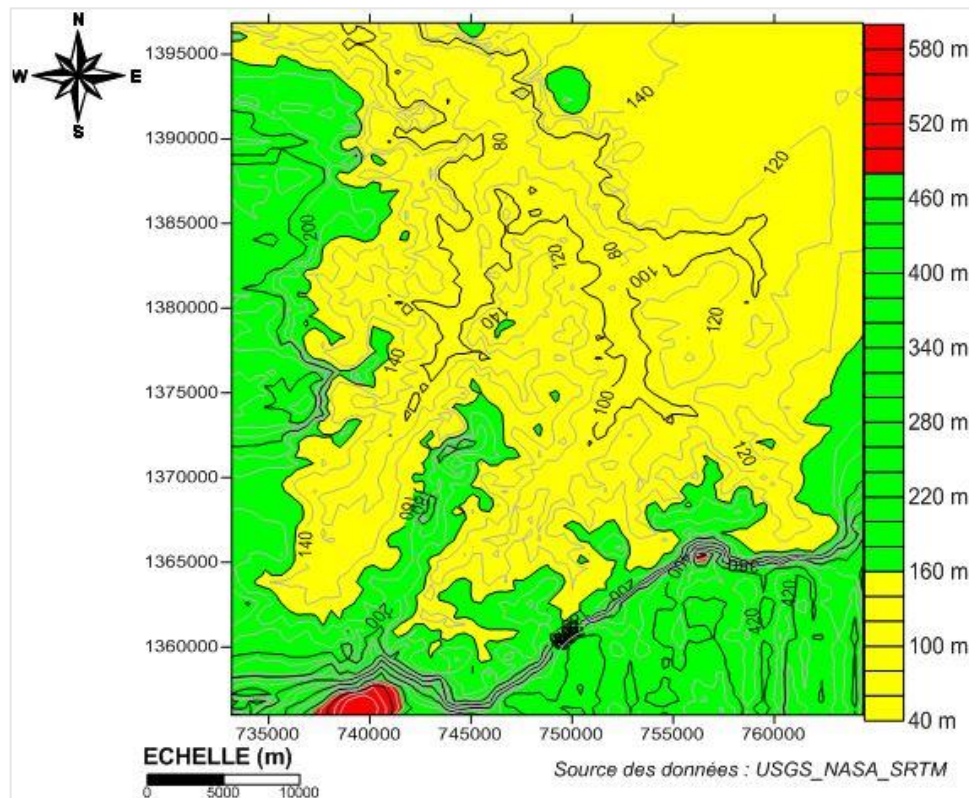


Figure 16. Courbes de niveau équidistantes de 20 m du bassin versant du Diarha

Les caractéristiques topographiques d'un bassin versant sont aussi déterminées à travers les pentes et leur orientation qui déterminent la vitesse avec laquelle l'eau du bassin s'écoule de l'amont vers l'aval.

II.1.1.2. Le système de Pente

Les pentes influencent l'écoulement aréolaire des eaux de ruissellement sur les versants. « Une pente plus forte correspond à une durée plus faible de concentration des eaux de ruissellement dans les canaux de drainage et de là dans les affluents et le cours principal » (Roche M., 1963). Le système de pente détermine avant tout les conditions d'adret et d'ubac et accélère le ruissellement direct sur les versants ainsi que le passage en ruissellement concentré.

À l'instar du relief, les pentes du bassin du Diarha sont très importantes. Elles varient entre 0 et 43° (Fig.17). Les pentes les plus élevées sont localisées dans la partie Sud du bassin et au Nord-ouest où elles varient entre 6° et 20°. Ces pentes se situent au niveau des talus de raccordement, c'est-à-dire la zone de transit entre les zones de plateaux et les zones de bas-fonds.

Les classes de pentes 0-2° ; 3-4° et 5-8° éparpillées un peu partout dans le bassin, occupent à elles seules plus de 86% de la superficie du bassin. La classe de pente 23-43°, très localisée, notamment le long de la partie méridionale du massif du Fouta Djallon et au nord-ouest (monts Bassaris), n'occupe que 3.8% du bassin.

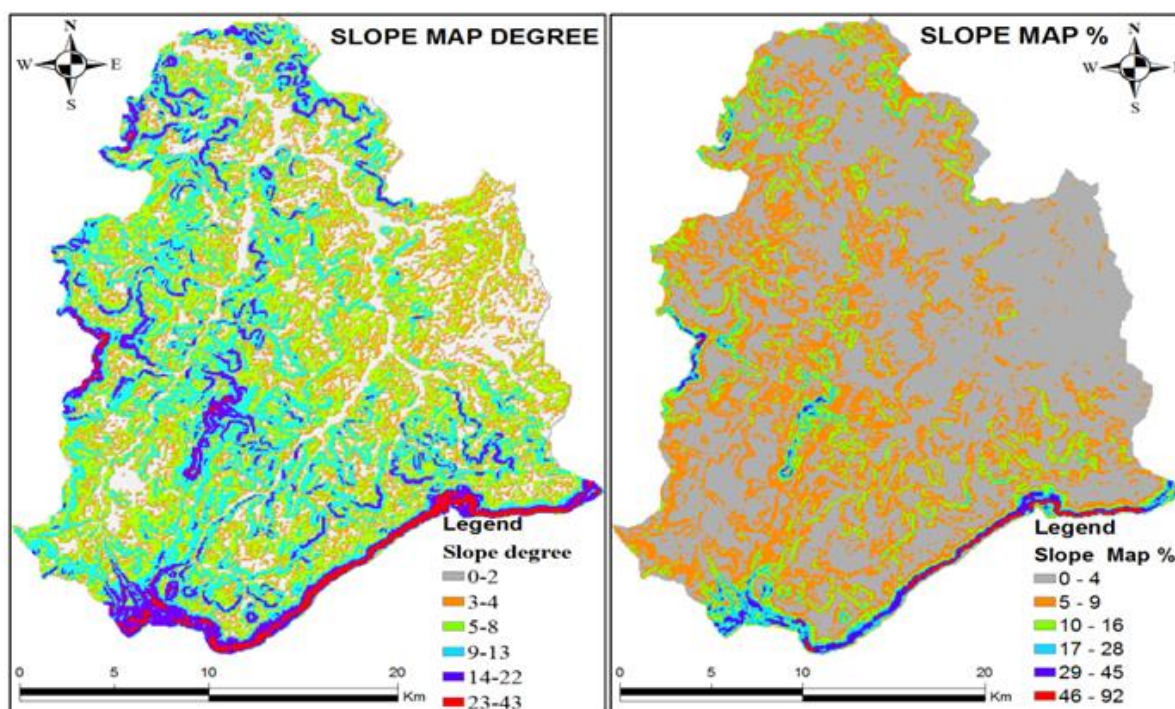


Figure 17. Répartition spatiale des pentes (en degré et en pourcentage) du bassin du Diarha

II.1.2. Caractéristiques géométriques du bassin

Le bassin versant du Diarha a une superficie de 759.3 km² et un périmètre de 145.1 km. Son indice de compacité (Kc) est de 1.5 ; il reflète donc une forme assez allongée. En principe, un bassin allongé favorise un faible débit de pointe et un long temps de concentration des eaux de ruissellement d'amont en aval.

Tableau 6. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Diarha

Surface	Périmètre	Kc	L	<i>l</i>	D	D _s	Ig	Ip Roche
(km ²)	(km)		(km)	(km)	(m)	(m)	(m/km)	
759,3	145,1	1,5	59,9	12,7	182,5	86,8	3,1	1,95

L'analyse des tableaux 6 et 7 révèle que, dans l'ensemble, le bassin versant du Diarha se caractérise par un relief modéré : la Dénivelée Spécifique (D_s) est égale à 86.8 m.

Tableau 7. La dénivelée spécifique (D_s) selon la classification IRD

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

L'hétérogénéité de la topographie du bassin se lie aussi à travers la courbe hypsométrique. Son analyse montre que seuls 2% de la superficie du bassin ont des altitudes qui dépassent 300 m ; 5 % entre 200 et 300 m d'altitude ; 87% entre 100 et 200 m d'altitude et 6% de l'aire du bassin ont moins de 100 m d'altitude.

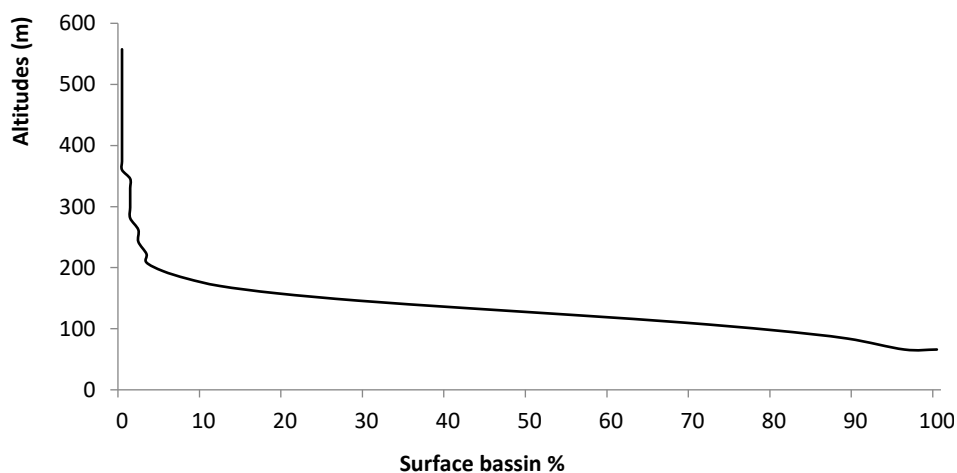


Figure 18 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Diarha.

II.2. Les caractéristiques du chevelu hydrographique

Le réseau hydrographique constitue l'ensemble des cours d'eau, des affluents et sous affluents d'une même rivière ou fleuve. Le tracé du réseau avec ses différentes ramifications est appelé chevelu hydrographique. Divers paramètres descriptifs sont utilisés pour sa caractérisation parmi lesquels : la topologie, la longueur et les pentes caractéristiques du réseau.

II.2.1. La Topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau

L'organisation du réseau de drainage et la pente des talwegs, fruits de l'évolution géologique, sont liés au relief, mais aussi, par certains aspects, directement aux caractéristiques pédologiques. Leur prise en compte est indispensable à une bonne compréhension du déclenchement et de la propagation des crues.

C'est Horton R.E. (1932), puis Schumm S.A. (1956), ensuite Strahler A.N. (1957) qui donnèrent l'expression mathématique de l'adage populaire qui dit « les petits ruisseaux font les grandes rivières ». Cette classification permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin de l'amont vers l'aval. Elle se base sur les règles suivantes :

- tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1 ;
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre le cours d'eau résultant est d'ordre $n+1$;
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre.

Conformément à ce système de codification, les bassins versants de tailles moyennes (ordres 4, 5 et 6) sont considérés comme les plus représentatifs pour les études morpho-hydrographiques quantitatives. Les études de ces bassins versants sont plus complexes que celles réalisées dans les petits bassins versants (ordres 1, 2 et 3), qui se trouvent généralement dans un état de déséquilibre (Grecu F., Zăvoianu I., Zaharia L., *et al.* 2007).

Les figures 19 et 20 font ressortir les différentes ramifications du cours d'eau, les longueurs et confluences des talwegs ainsi que les centres de gravité des sous bassins du Diarha.

Né à environ 576 m d'altitude, le Diarha parcourt 47 km d'amont en aval. Il est formé à la confluence de deux cours d'eau d'ordre 5, l'un en rive gauche (le Niogola) et l'autre en rive droite (le Fangama). Il parcourt ensuite 17.5 km avant de recevoir successivement les marigots de Diouguel, Dakately et Kéwé en rive droite, et celui de Termessé, son plus grand affluent, en rive gauche. Après sa confluence avec le Termessé, le Diarha bifurque légèrement au Nord-est

où il reçoit les marigots de Mbéma et Gokodou en rive droite, puis au Nord-ouest, celui de Bilèle, en rive gauche.

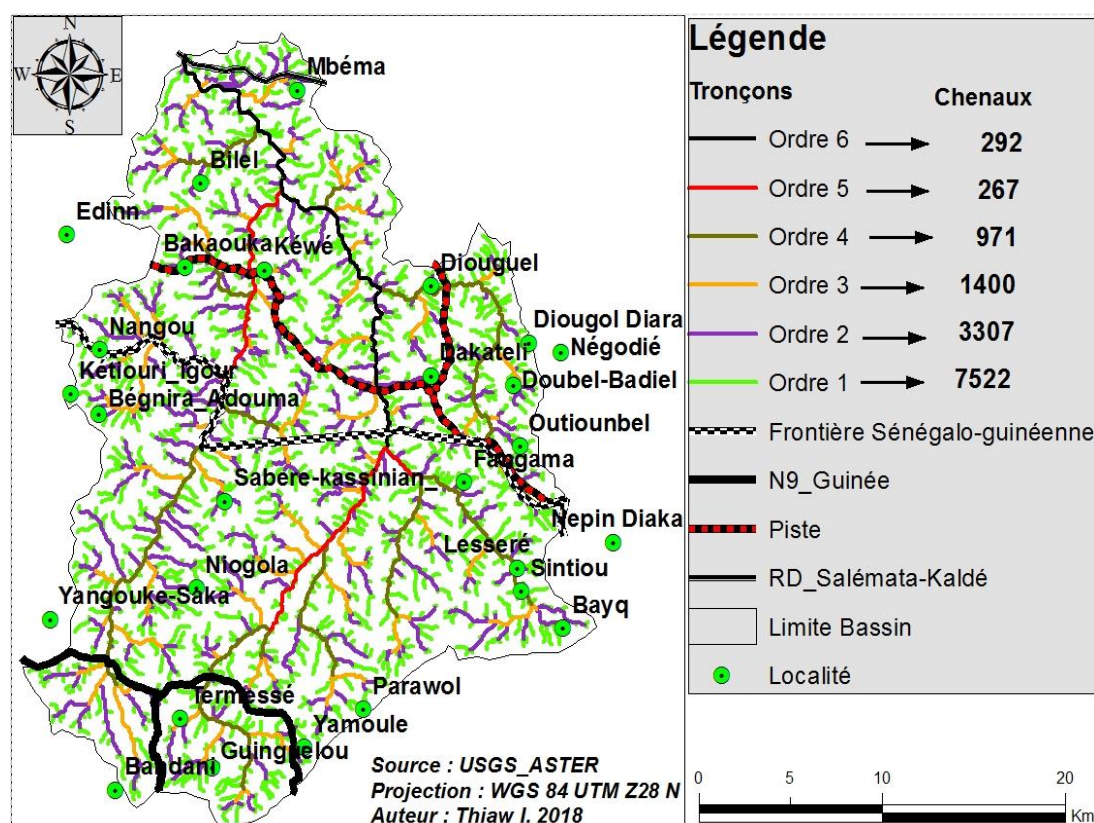


Figure 19. Hiérarchisation du cours d'eau selon la méthode de Horton-Strahler

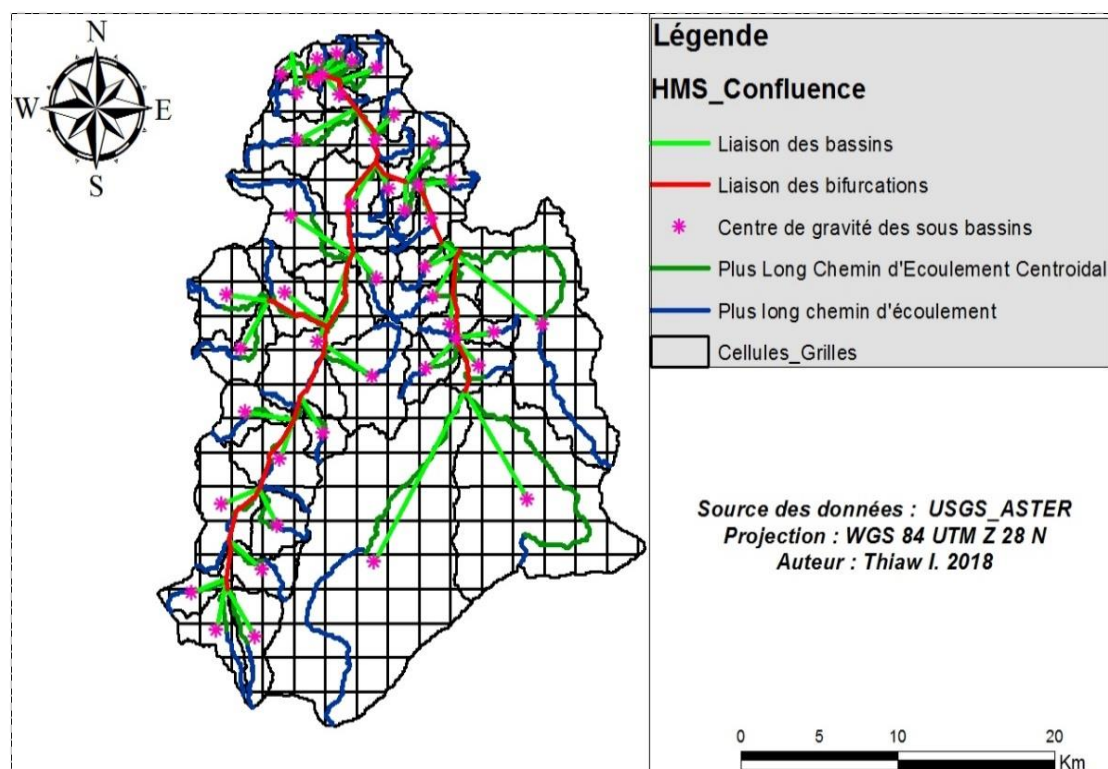


Figure 20. Centre de gravité, longueur des talwegs et confluence des bifurcations du Diarha

Le bassin versant du Diarha a une forme évasée au Sud, où les principaux apports proviennent du massif du Fouta Djallon, et une forme plus ou moins allongée au nord, tout juste après la latitude 12°30 nord en territoire sénégalaise. Les principaux apports dans cette partie sénégalaise du bassin proviennent des collines Bassaris, à pentes raides, qui accélèrent le ruissellement direct sur les versants.

II.2.2. Les Pentes Caractéristiques du Réseau de Drainage

Les observations menées sur les différents ordres des cours d'eau (Tab.8) vérifient les règles selon lesquelles les nombres et les longueurs des segments d'ordres successivement croissants tendent à former respectivement une progression géométrique inverse et directe. C'est pourquoi nous avons estimé directement les valeurs moyennes de R_C et R_L , dont les logarithmes correspondent à la pente des droites ajustées ($\log N_x$ et $L_i = a.e^{b*x}$), sur un graphique semi-logarithmique (Fig.21).

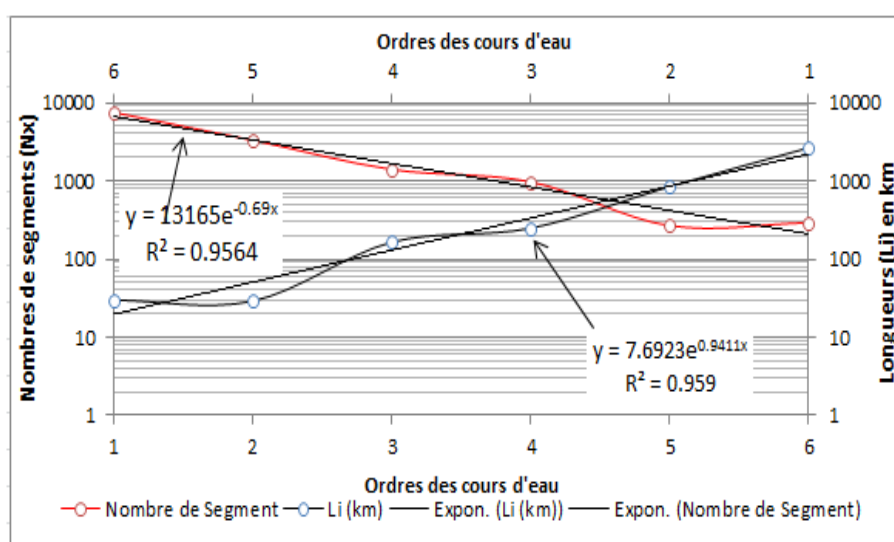


Figure 21. Ajustement graphique de la droite aux couples N_x , L_i et x

Le nombre important des segments de cours d'eau d'ordres inférieurs (1 à 3) résulte d'une réponse rapide du réseau hydrographique aux impulsions pluviométriques. En considérant les seuls segments (1 et 2), on obtient un rapport de confluence de 2.27. Une valeur élevée de ce rapport se retrouve également dans les segments d'ordres 2 et 3 ($R_C = 2.36$). Le rapport de confluence moyenne du bassin versant du Diarha est de 2.13.

Contrairement aux ratios des bifurcations, les longueurs moyennes (L_x) des cours d'eau forment une série géométrique directe (Tab.8). Les segments d'ordres inférieurs ont une longueur totale de 3744 km. Cette forte valeur explique la formation brutale des crues du Diarha, (Thiaw I., 2017).

Les valeurs du tableau 8 permettent également d'estimer d'autres caractéristiques du chevelu hydrographique telles que : les densités de drainage et hydrographique, la fréquence des talwegs élémentaires et le coefficient de torrentialité qui donnent une idée sur l'organisation du réseau de drainage, laquelle dépend fortement du climat et de la structure géomorphologique.

Tableau 8. Rapports de confluences et de longueurs du réseau de drainage

Ordres	Nombres de chenaux	Longueurs (km)	Lx	Nx
1	7522	2650	0.35	2.27
2	3307	846	0.26	2.36
3	1400	248	0.18	1.44
4	971	164	0.17	3.64
5	267	29	0.11	0.91
6	292	30	0.10	
Total	13759	3966.4		

Le bassin versant du Diarha a une densité de drainage moyenne de 5.2 km/km² (Tab.9). Cette forte valeur est liée essentiellement aux segments d'ordres inférieurs. Si on considère ces seuls segments, la densité de drainage s'élève déjà à 4.9 km/km², valeur influencée par les ravinements des formations paléozoïque et protérozoïque du socle birrimien.

Tableau 9. Autres caractéristiques du chevelu hydrographique

Densité-drainage (Dd) (km/km ²)	Densité hydrographique (Dh)	Fréquence des talwegs (F1)	Coefficient de torrentialité (Ct)	Pmoy (m/km)
5.2	18.1	9.9	0.52	11.1

Le coefficient de torrentialité est fortement dépendant de la densité de drainage. Il donne une idée sur les apports hydriques des segments inférieurs au cours d'eau principal. La valeur 0.52 signifie que plus de la moitié du réseau est constituée des cours d'eau d'ordre 1. Ce caractère torrentiel du Diarha est aussi confirmé par la valeur de la pente moyenne du cours d'eau (11.1m/km). Or, compte tenue de l'hétérogénéité des éléments de la morphologie du bassin versant du Diarha, la détermination de ses sous bassins et la connaissance de leurs caractéristiques physiographiques demeurent indispensables dans une perspective d'analyse du fonctionnement hydrologique en comparant la contribution des sous bassins par rapport à celui du grand bassin. En outre, la complexité du fonctionnement hydrologique des bas-fonds nécessite une connaissance plus poussée des caractéristiques des sous bassins.

Conclusion

Le bassin versant du Diarha draine une superficie de 759,3 km² sur un périmètre de 145,1 km. Il se caractérise par un réseau bien ramifié avec un ordre 6 à son exutoire au pont routier. L'importance du réseau de drainage est à mettre en rapport, en dehors du climat, aux caractéristiques hydrogéologiques, biogéographiques et topographiques, lesquelles favoriseront sans doute la répartition et la variabilité spatiale des apports en eau du Diarha. Il serait alors intéressant de caractériser les différentes aires contributives du ruissellement, à travers une étude spécifique des caractéristiques biophysiques des sous bassins et bas-fonds du bassin versant du Diarha.

CHAPITRE III. CARACTERISATION DES BAS-FONDS DANS LES SOUS BASSINS DU DIARHA

Introduction

Ce chapitre analyse les caractéristiques morphométriques, topographiques et d'occupation des sols des sous bassins du Diarha. L'analyse de ces paramètres permet de mieux comprendre les différentes aires contributives des écoulements ; et, étant donné que cette recherche est orientée vers l'étude des bas-fonds, la caractérisation physiographique des sous bassins s'avère essentielle pour une meilleure connaissance de leur fonctionnement hydrologique.

III.1. Caractérisation des sous bassins versants du Diarha

Le bassin versant du Diarha est constitué de neuf sous bassins dont trois en rive gauche (Niogola, Termessé et Bilèle) et six en rive droite (Fangama, Diouguel, Dakately, Kéwé, Gokodou et Mbéma). Les différentes configurations de ces bassins sont matérialisées à la figure 22.

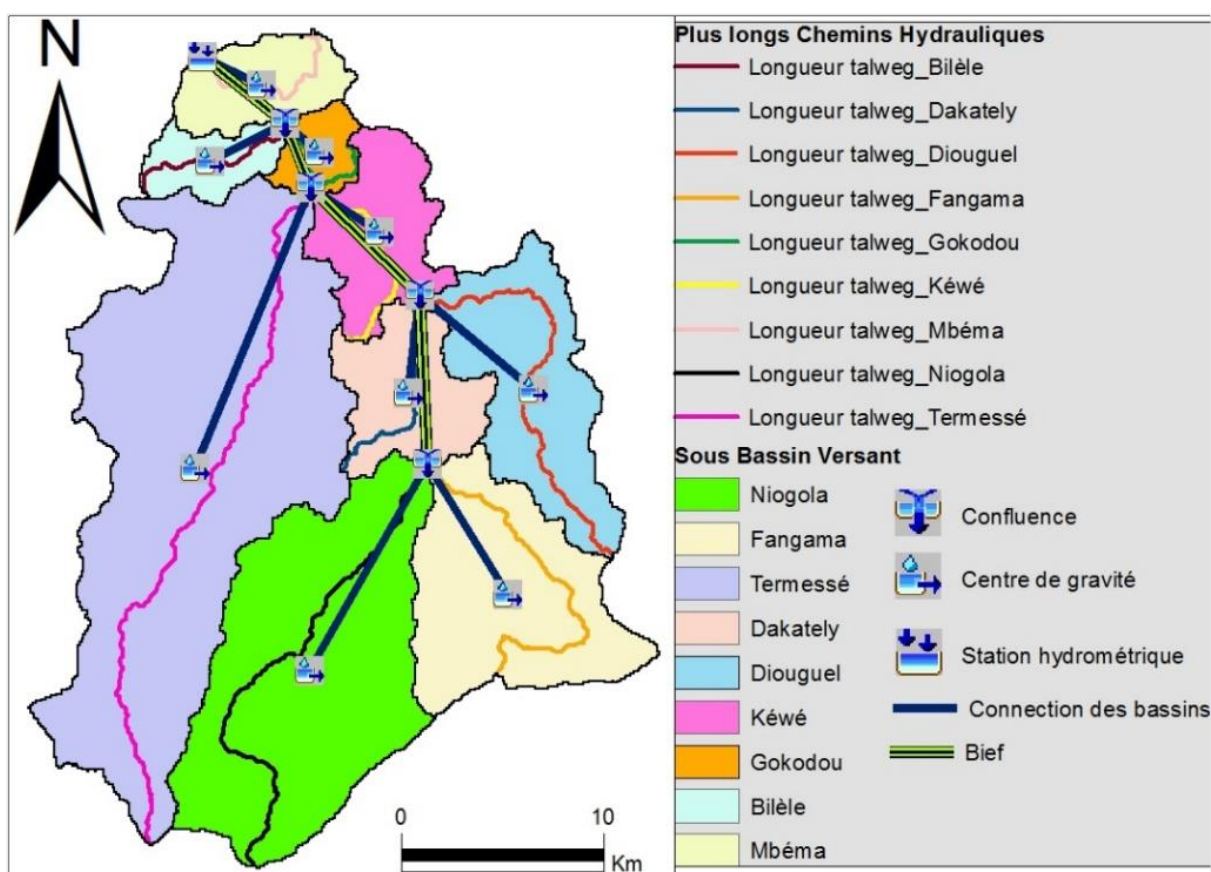


Figure 22. Les sous bassins versants du Diarha.

III.1.1. Caractérisation des bassins de rive gauche

III.1.1.1. Le bassin versant du Termessé

Situé entre 12°18' et 12°32'nord et entre 12°36' et 12°54'ouest, le bassin versant du Termessé couvre une superficie de 274.8 km² et un périmètre de 102.7 km. Il est orienté SSE-NNW et parcourt environ 40.3 km d'amont en aval (Fig.23).

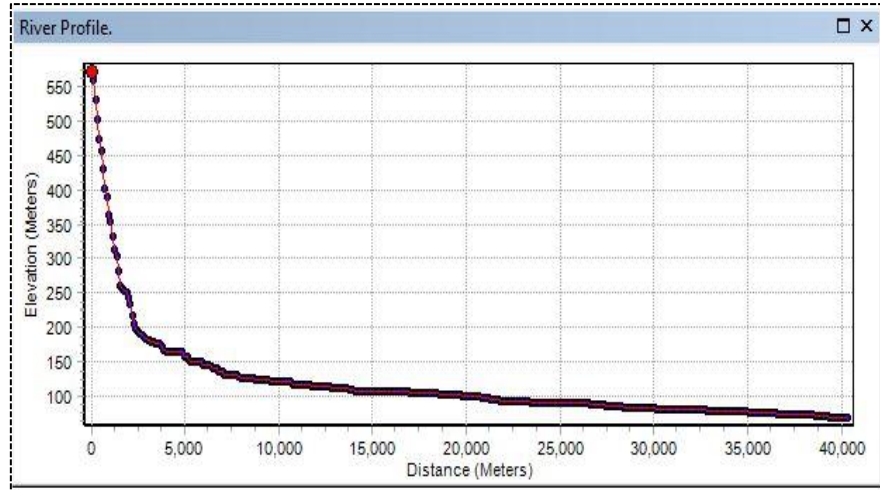


Figure 23. Profil en long du Termessé

La configuration générale de son relief met en évidence trois unités géomorphologiques (Fig. 24) : hauts plateaux, glacis cuirassés et terrasses. Les altitudes varient entre 576 m à Bandani (Guinée Conakry) et 67 m à sa confluence avec le Diarha dans la localité de Bakaouka.

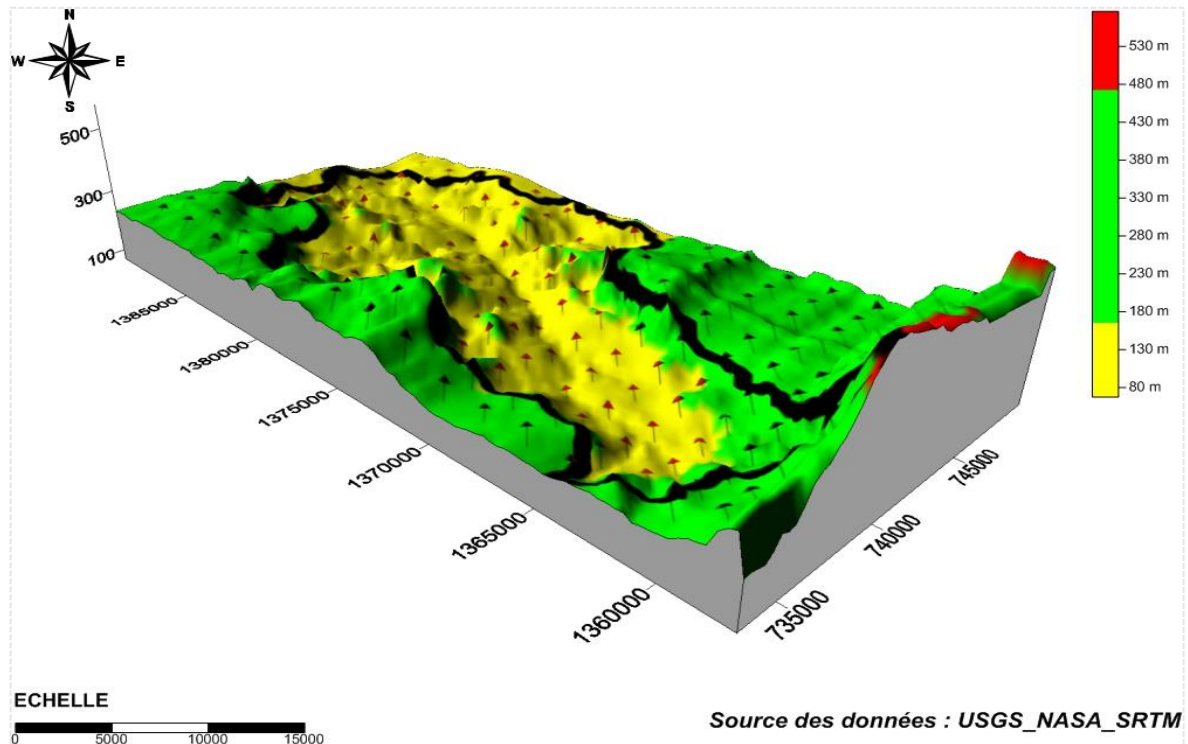


Figure 24. MNT 3D du bassin versant du Termessé

Le tableau 10 donne la synthèse des caractéristiques orographiques du bassin versant du Termessé. Son analyse montre que le relief du bassin est assez fort et se caractérise par des pentes abruptes. Sa pente moyenne (Ipmoy), qui donne une idée sur la déclivité générale du terrain, est élevé (30.7m/km).

Tableau 10. Morphométrie de la topographie du bassin du Termessé

Alt. Max	Alt. Min	Alt. Médiane	Quartile 75%	ΔH	Ipmoy
m	m	M	m	m	m/km
576	67	261,5	382,5	509	30,7

Par ailleurs, l'hétérogénéité de la topographie du bassin se lie plus à travers sa courbe hypsométrique (Fig.25). Celle-ci révèle que :

- 85% de la superficie du bassin du Termessé ont des altitudes inférieures à 200 m
- 13 % entre 200 et 300 m d'altitude ; et seulement 2 % ont plus de 300 m d'altitude.

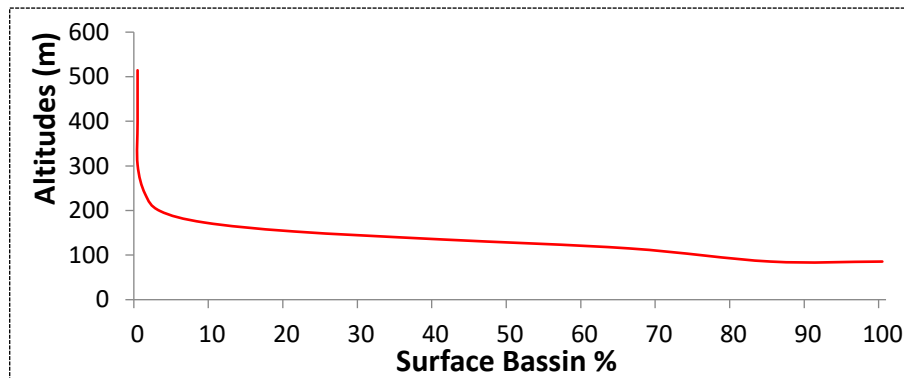


Figure 25. Courbe hypsométrique du bassin versant du Termessé

Le bassin du Termessé se caractérise par une forme assez allongée, le coefficient de compacité est de 1.7 (Tab.11) ; en principe son temps de réponse face à une sollicitation doit être court.

Le temps de réponse à la pluie représente l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette du centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface. Ce paramètre, utilisé pour la mise en œuvre des modèles pluie-débit, correspond dans cette étude à la moitié du temps de concentration.

Le temps de concentration du Termessé, estimé à partir de la moyenne des trois méthodes (Kirpich, Passini et Ventura) est égal à 5 h 24 mn. Cette faible valeur est fortement influencée par la taille et la forme du bassin versant.

Tableau 11. Synthèse des paramètres morphométriques du bassin du Termessé

Surface	Périmètre	Kc	L	l	D	Ds	Ig	Ip Roche
(km ²)	(km)		(km)	(km)	(m)	(m)	(m/km)	
274.8	102.7	1.7	45.3	6.1	334.5	122.5	7.4	3

À l'image du relief, les pentes transversales du bassin sont aussi élevées (Fig.26). Deux profils ont été réalisés pour mieux tenir compte de la variation de la topographie et améliorer la connaissance sur les apports hydriques des versants au cours d'eau principal : l'un au centre de gravité du bassin et l'autre près de sa confluence avec le Diarha. La pente transversale moyenne du bassin varie entre 5 et 7%.

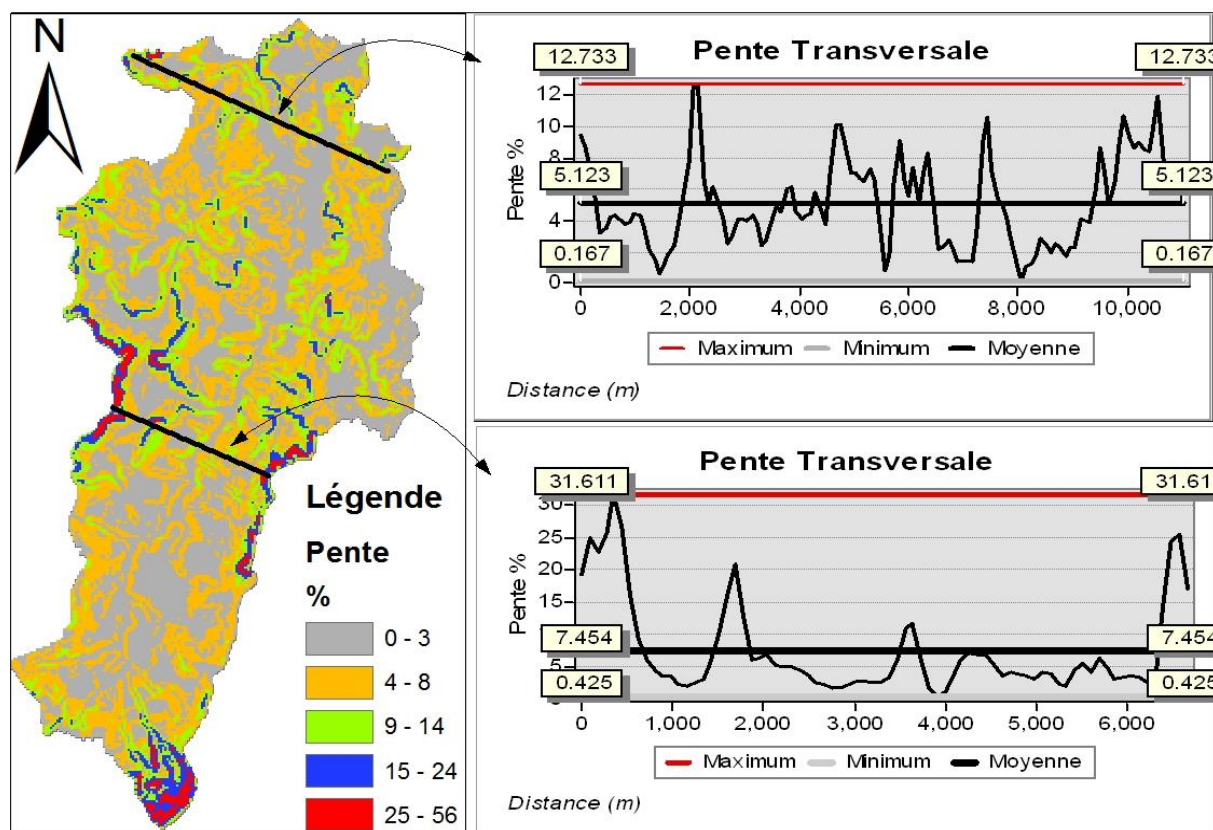


Figure 26. Le système de pentes du bassin versant du Termessé

L'importance du relief et du système de pente du bassin du Termessé influence sa sensibilité à l'érosion hydrique des sols et explique – avec l'intensité des précipitations et les caractéristiques lithologiques – les forts taux d'érosion qui y sont observés. En effet, les travaux de Thiaw I., et Dacosta H., (2017) attestent que de tous les sous bassins du Diarha, celui du Termessé est le plus affecté par l'érosion hydrique des sols. Les pertes annuelles en sols y sont estimées à 13298t/an, soit une dégradation spécifique de 48.4t/km²/an.

L'organisation de son réseau de drainage est fortement influencée par sa structure géomorphologique. Son analyse montre que le Termessé est bien drainé : il a un ordre 5 à sa confluence avec le Diarha (Fig.27) et une densité de drainage moyenne de 14.3 km/km² (Tab. 12). Cependant, les cours d'eau d'ordre 1 représentent plus de la moitié du réseau de drainage : le coefficient de torrentialité (Ct) est de 0.52. La longueur moyenne des cours d'eau est estimée à 0.21 km avec un ratio de bifurcation moyenne de 2.43.

Tableau 12. Caractéristiques du réseau de drainage du Termessé

Densité de drainage	Densité hydrographique	Fréquence des talwegs	Coefficient de torrencialité	Pente moyenne
(km/km ²)				(m/km)
14.3	49	27.4	0.52	12.6

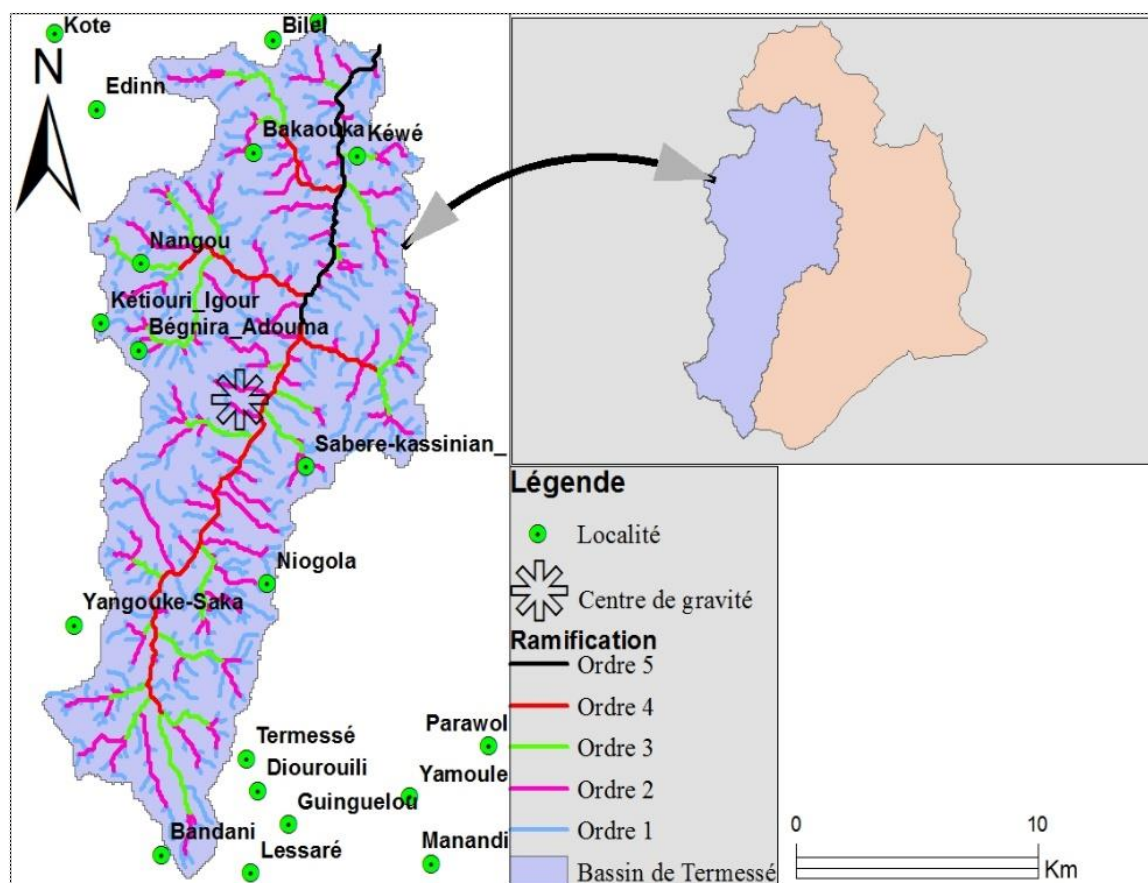


Figure 27. Le réseau de drainage du bassin versant du Termessé

III.1.1.1.1. Morphopédologie du bassin versant du Termessé

Six (6) classes de sols intéressent le bassin du Termessé (Fig.28). Il s'agit :

- des lithosols sur cuirasse, qui occupent 6.6 % de la superficie du bassin ;
- des régosols sur matériau gravionnaire (1.3%) ;
- des associations de sols ferralitiques et sols peu évolués (52.3%),
- de sols hydromorphes et sols peu évolués organiques (17.2%),
- de sols squelettiques d'affleurement de cuirasse et d'éboulis sur cuirasse (7.1%)
- et de lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravionnaire (15.5%).

La diversité et la répartition des unités pédologiques du bassin du Termessé sont à mettre en rapport avec sa position en latitude. En effet, ce bassin est à cheval entre le département de

Salémata, dans sa partie sénégalaise, et la préfecture de Koundara en Guinée. C'est cela qui favorise la différenciation pédologique d'amont en aval. En amont, dans la partie guinéenne du bassin, ce sont les sols ferralitiques et les sols squelettiques qui y dominent, tandis que dans sa partie aval (département de Salémata), on retrouve plutôt des cuirasses latéritiques et des sols régosoliques.

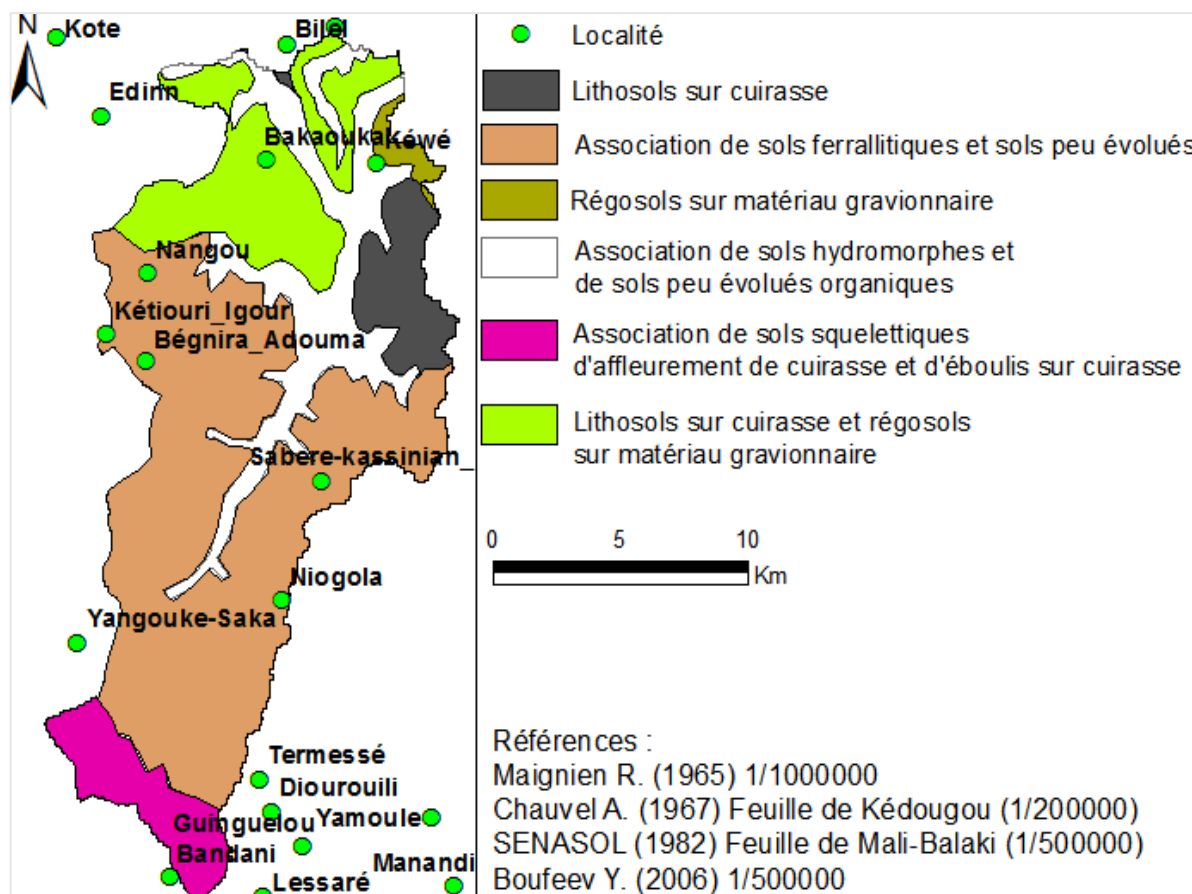


Figure 28. Bassin du Termessé – Carte morphopédologique.

III.1.1.1.2. Occupation des sols du bassin versant du Termessé

Les unités d'occupation du sol du bassin du Termessé ont été extraites de la carte d'occupation des sols du bassin du Diarha, à l'aide de l'outil « Clip » du logiciel ArcGis. La figure 29 montre les différentes classes d'occupation du sol du bassin du Termessé. Son analyse montre que les formations végétales sont les unités les plus répandues. Elles occupent 43% de la superficie du bassin.

Les zones de culture couvrent 11 km², soit 4% du bassin et 13.1% de la superficie totale des bas-fonds (Fig.30). Elles sont réparties entre le département de Salémata (Sénégal) et la préfecture de Koundara (Guinée).

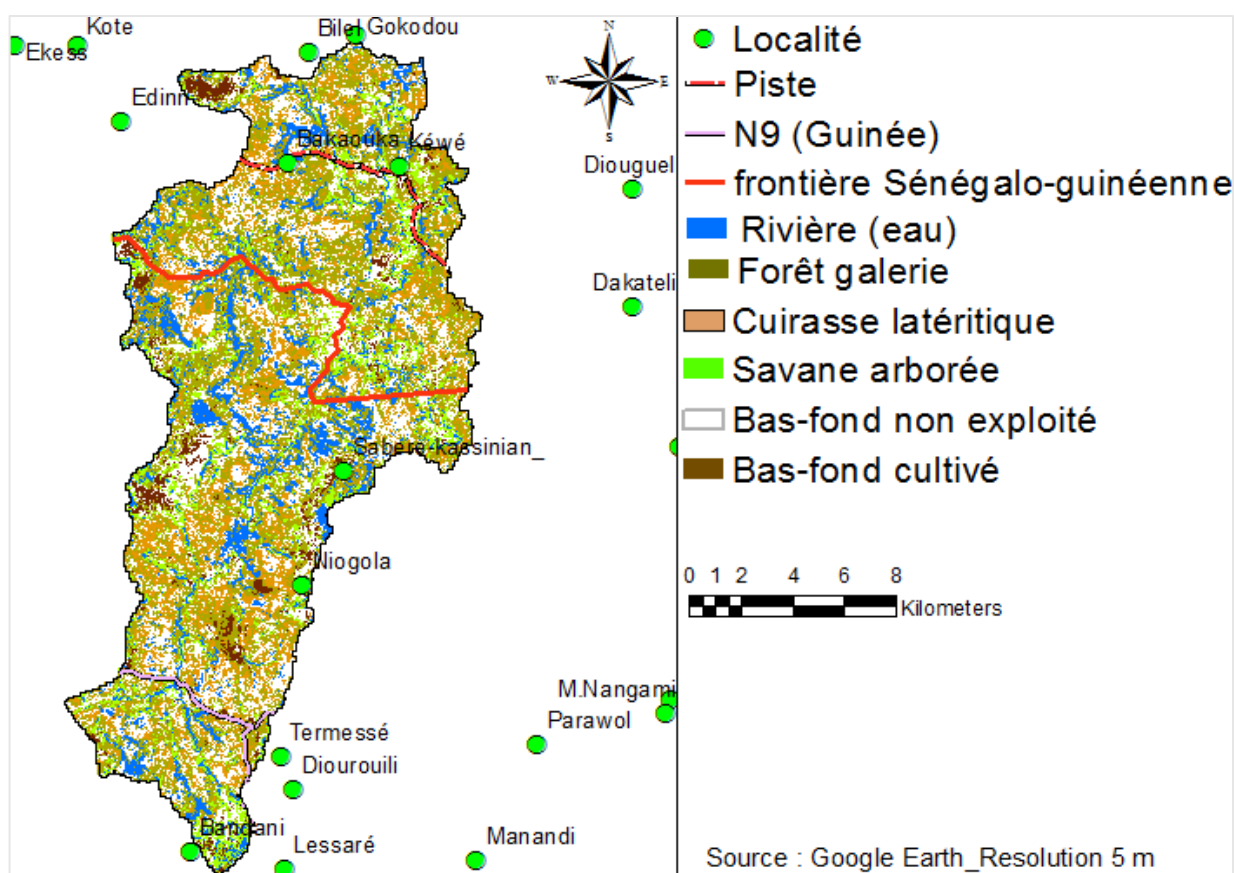


Figure 29. Bassin du Termessé – Carte d’occupation des sols.

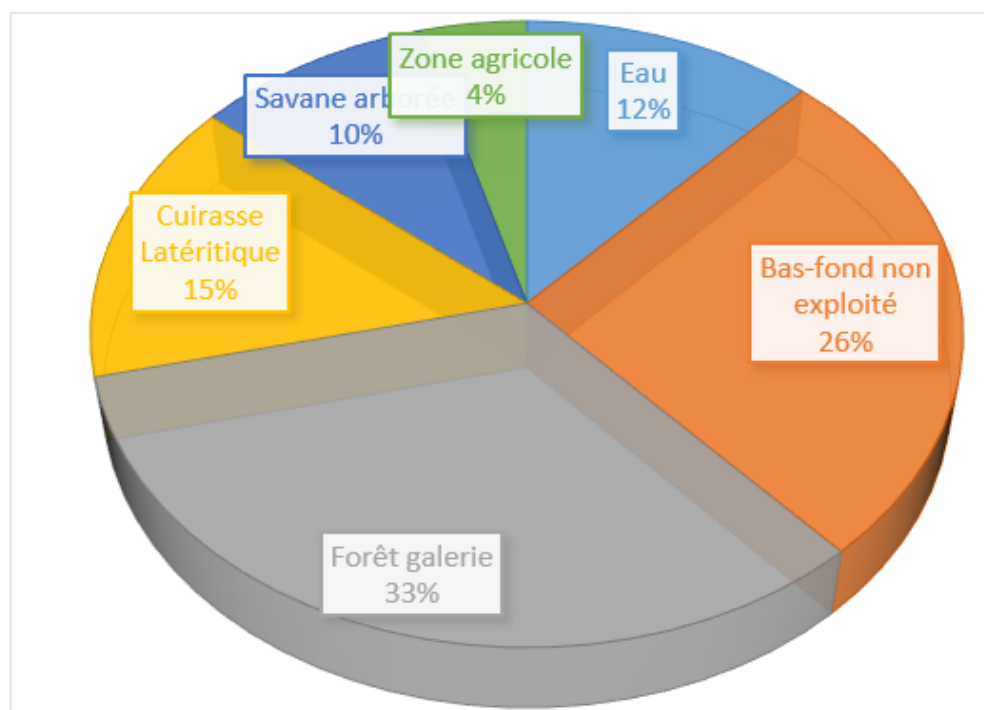


Figure 30. Bassin du Termessé - Pourcentage des unités d’occupation du sol.

III.1.1.1.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin du Termessé

Le bassin du Termessé contient 82 km² de zones inondables soit 30% de la superficie du bassin. Il s'agit des bas-fonds localisés le long du Termessé et de ses affluents. Ils sont répartis entre les sites de Sabéré-Kassinian, Bakaouka, Yangouke-Saka, Bégnira-Adouma, Kétiouri-Igour et de Nangou et se distinguent surtout par la topographie. Le tableau 13 montre les caractéristiques morphométriques de ces bas-fonds. L'analyse de ce tableau montre que les bas-fonds du bassin du Termessé couvrent des superficies comprises entre 4.5 km² (Yangouke-Saka) et 27.4 km² (partie aval de la vallée du Termessé). Ils sont creusés aux pieds des falaises de grès quartzites de Bandani et des massifs de pélites et schistes calcaireux de Termessé, dans la partie guinéenne, et des collines Bassaris où dominant des formations géologiques légèrement métamorphisées datées du Birrimien inférieur. Il se produit aux pieds de ces reliefs un creusement linéaire dans les altérites où les eaux ruisselantes sur de fortes pentes se concentrent.

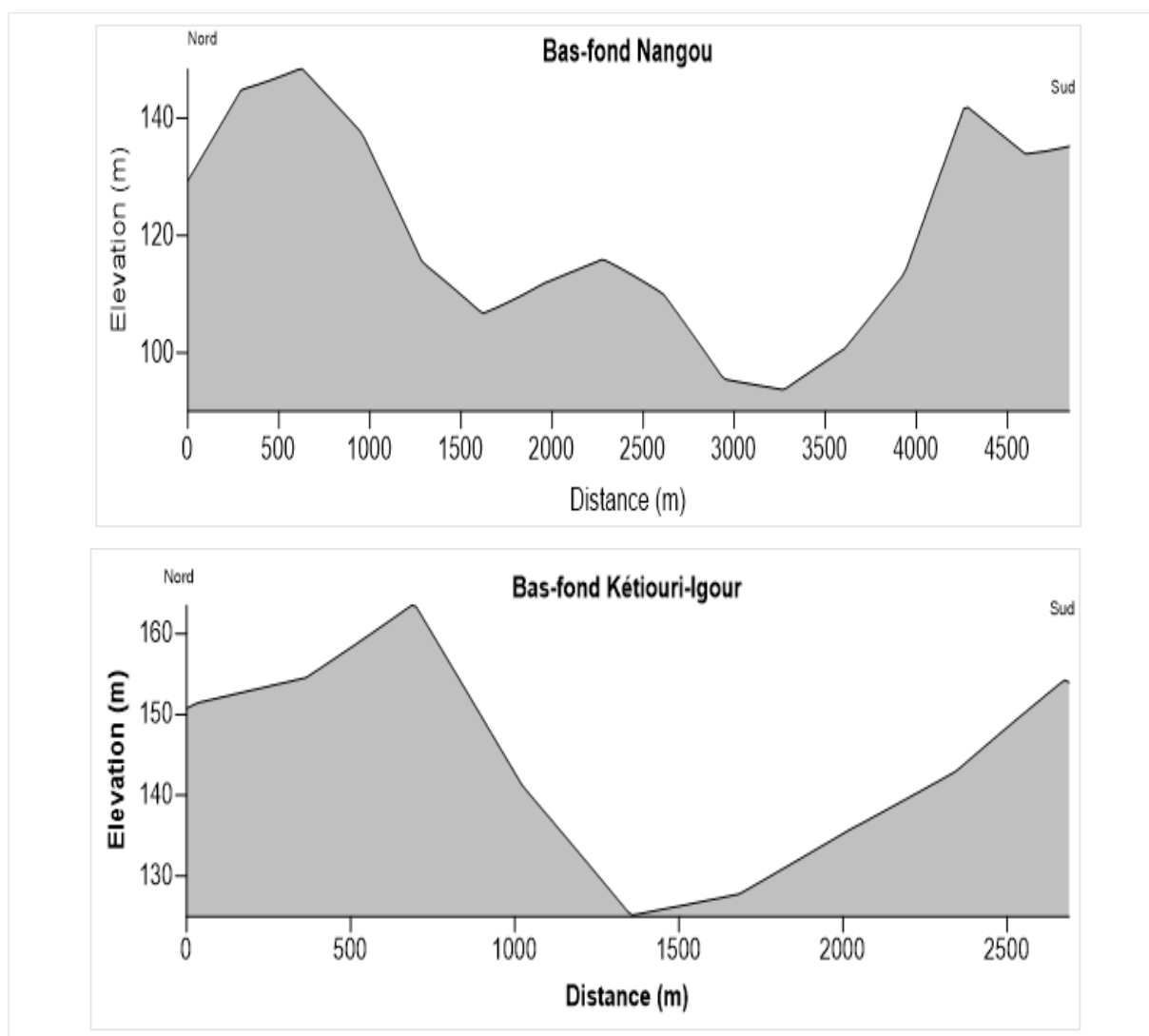
Tableau 13. Morphométrie des bas-fonds du bassin versant du Termessé

Bas-fonds	Surface (km ²)	Ramification	Forme	Pente versants %	Altitude moy. (m)
Sabéré-Kassinian	4,9	3	Concave	E (13.6%) ; SSW (3.6%)	123
Bakaouka	9,5	4	Fond plat	N (24%) ; S (3.6%)	108
Nangou	13,2	4	Fond plat	N (20.7%) ; S (2.9%)	123
Kétiouri-Igour	6,4	3	Concave	N (22.5%) ; S (5.8%)	145
Bégnira-Adouma	5,2	2	Fond plat	N (18.8%) ; S (4.8%)	130
Yangouke-Saka	4,5	2	Concave	NNW (28%) ; SSE (3.9%)	140
Termessé-Aval	27,4	5	Fond plat	NNW (13%) ; SSE (1.5%)	95
Termessé-Amont	10,7	4	Concave	SSW (34.7%) ; NNE (7.5%)	105

Les différentes ramifications et l'orientation des pentes (Tab.13) donnent une idée sur l'organisation du réseau de drainage des bas-fonds du Termessé :

- les eaux de ruissellement qui viennent des bas-fonds de Yangouke-Saka et Bégnira-Adouma se concentrent dans le bas-fond de Kétiouri-Igour qui déverse dans la partie amont de la vallée du Termessé (Termessé-amont). Ces eaux, en suivant leur chemin normal, devraient transiter au bas-fond de Nangou avant de se déverser dans la vallée du Termessé.
- Celles qui partent du bas-fond de Sabéré-Kassinian déversent directement à Termessé-amont ;
- Et celles qui quittent le bas-fond de Bakaouka alimentent directement la vallée de Termessé-aval ;
- L'ensemble de ces eaux de ruissellement convergent vers Termessé-aval qui couvre 27.4 km².

L'analyse des profils en travers (Fig.31) montre que le bassin du Termessé est marqué par des bas-fonds concaves à fond plat d'altitudes variant de 145m (Kétiouri-Igour) à 95m (Termessé-aval). L'étroitesse des bas-fonds et leur confinement sont à mettre en rapport avec les nombreux inselbergs qui dominent le bassin et l'intensité de l'érosion hydrique. En effet, les travaux de Thiaw I., Dacosta H., Mendy A., *et al.* (2017) évaluent la dégradation spécifique du bassin du Termessé à 48.4 t/km²/an et suggèrent la mise en place d'aménagements de contrôle du risque érosif pour limiter l'ensablement des rizières.



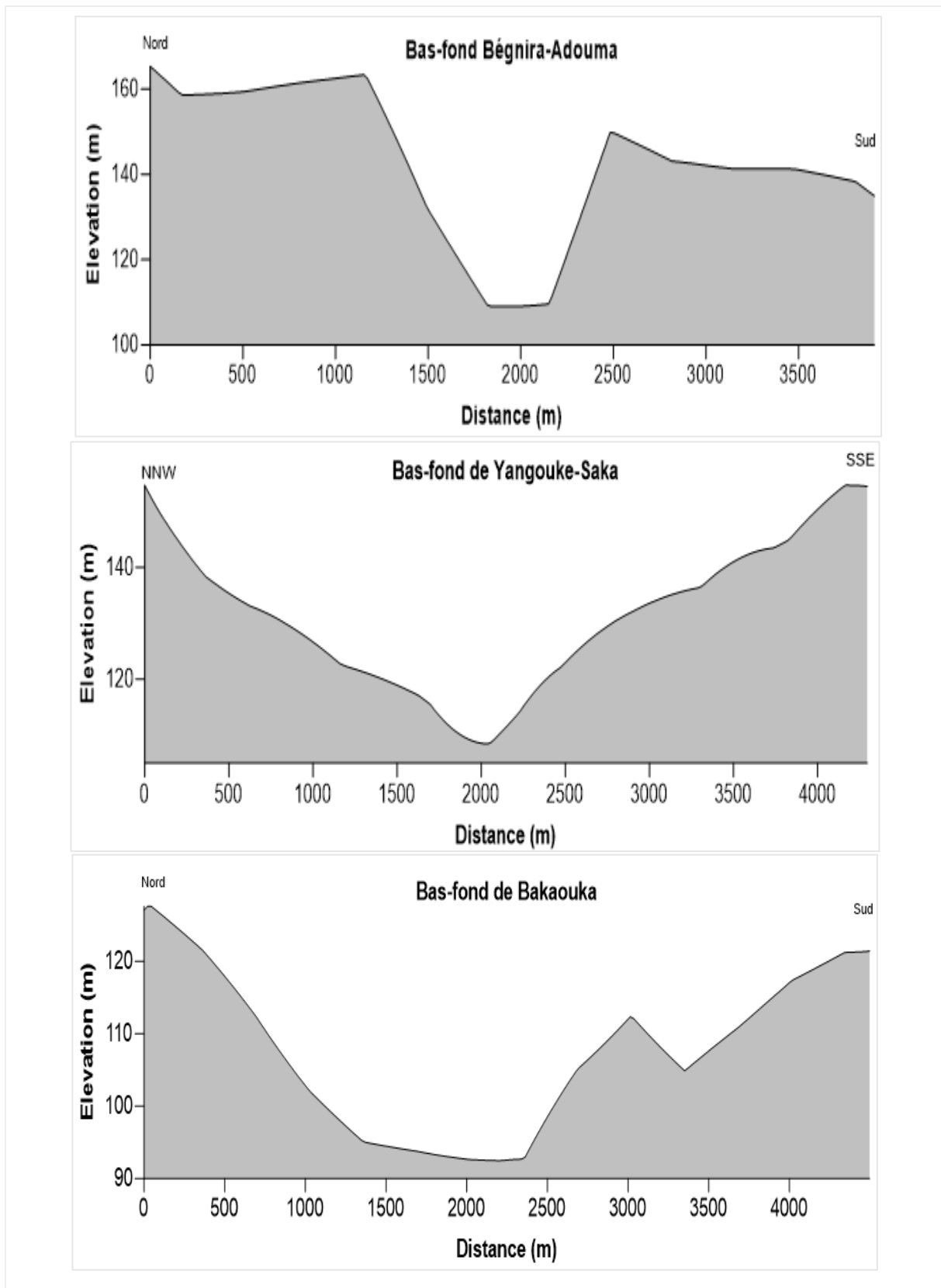


Figure 31.a – Profils en travers des bas-fonds du bassin du Terressé

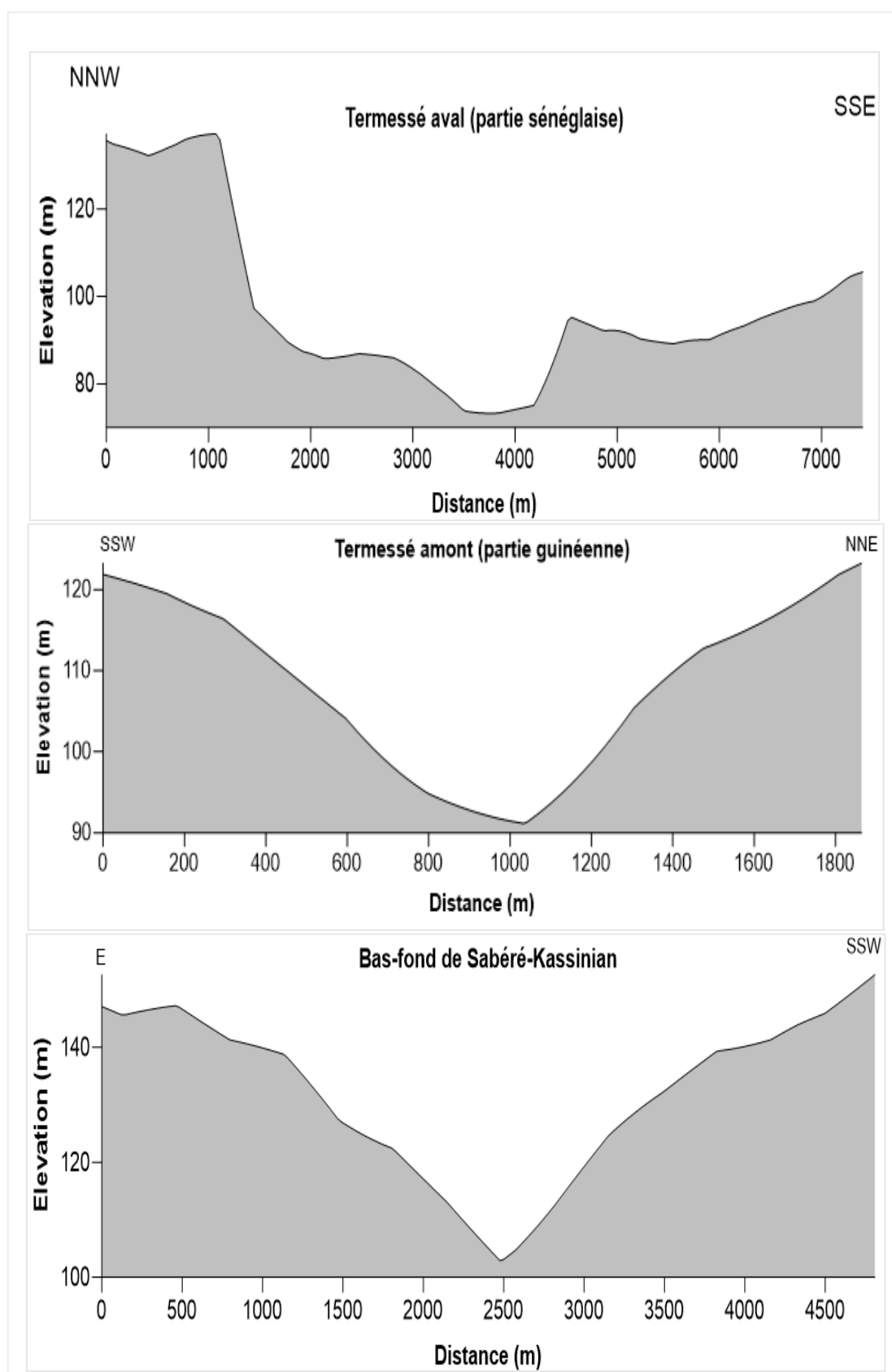


Figure 31.b – Profils en travers des bas-fonds du bassin du Termessé

III.1.1.2. Le bassin versant du Niogola

Situé entre 12°15'30' et 12°26'nord et entre 12°38'30' et 12°49'ouest, le Niogola parcourt 28.5 km d'amont en aval. Il est né sur les contreforts méridionaux du massif du Fouta Djallon à environ 510 m d'altitude. Le bassin est orienté SW-NE ; Sa structure géomorphologique est dominée essentiellement par des plateaux disséqués, des inselbergs et des dépressions (Fig. 32).

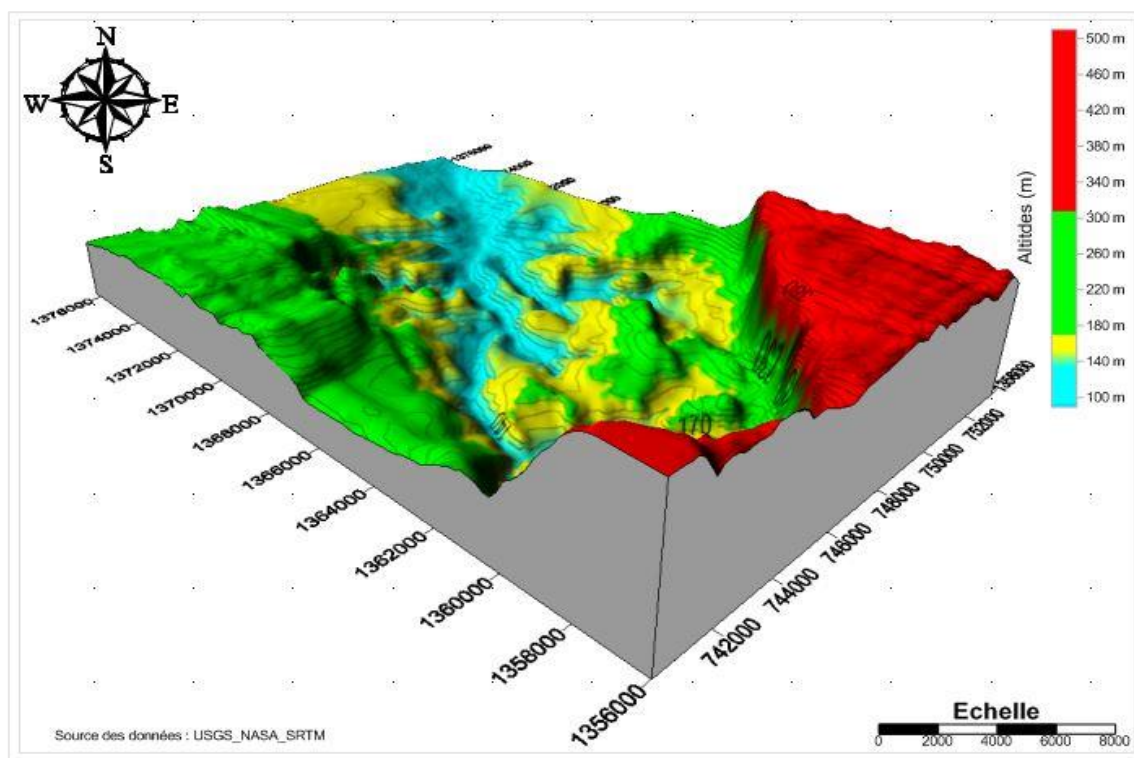


Figure 32. MNT 3D du bassin versant du Niogola

Le tableau 14 donne la synthèse des caractéristiques altimétriques du bassin versant du Niogola. Les altitudes varient entre 510 m au Sud (Lessaré) et 88 m à sa confluence avec le Fangama.

Tableau 14. Morphométrie de la topographie du bassin du Niogola

Alt. Max	Alt. Min	Alt. Moy	ΔH	Alt. Médiane	Quartile 75%	Ip moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
510	88	275	422	273	365	33,4

L'hétérogénéité de la topographie du bassin se lie également à travers la courbe hypsométrique.

Sa lecture montre que :

- 5% de la superficie du bassin ont des altitudes supérieures à 300 m ;
- 11% ont des altitudes comprises entre 200 et 300 m ;
- Et 84% ont moins de 200 m d'altitude.

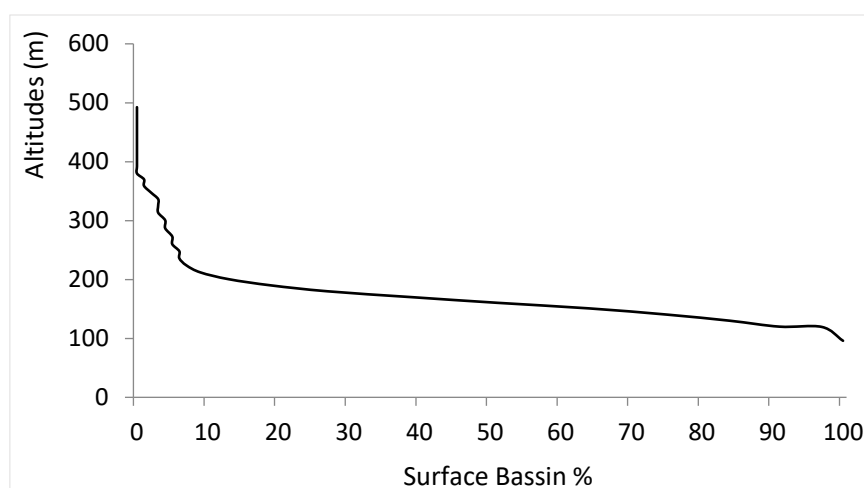


Figure 33 : Courbe hypsométrique du bassin du Niogola

Contrairement au marigot de Termessé, qui est à cheval entre deux États (le Sénégal et la Guinée Conakry), le Niogola se trouve entièrement dans les formations doléritiques et ferrallitiques de la préfecture de Koundara (Guinée Conakry). Il offre toutes les caractéristiques d'un bassin de « montagne », marqué par des pentes abruptes et un fort pouvoir érosif des eaux de ruissellement.

Influencé par sa forme allongée, sa taille et ses fortes pentes transversales, les eaux de ruissellement mettent environ 4 h 18 mn pour arriver à sa confluence avec le Fangama (Tab.15 et Fig.34).

Tableau 15. Synthèse des paramètres morphométriques du bassin du Niogola

Superficie	Périmètre	K _C	L	<i>l</i>	D	I _g	D _s	I _p Roche	L. talweg	Pente talweg	T _c
km ²	km		km	km	m	m/km	m		km	m/km	Heure
159.3	58.9	1.3	22.3	7.1	200	9.72	122.7	3.49	28.5	7.61	4.3

La densité de drainage du bassin versant du Niogola est estimée à 24.7 km/km² pour une superficie de 159.3 km² et un ordre 5 à l'exutoire (Tab.16 et Fig.35).

Tableau 16. Caractéristiques du réseau de drainage du bassin versant du Niogola

Densité de drainage (km/km ²)	Densité hydrographique	Fréquence des talwegs	Coefficient de torrentialité
24.7	84.5	47.1	0.52

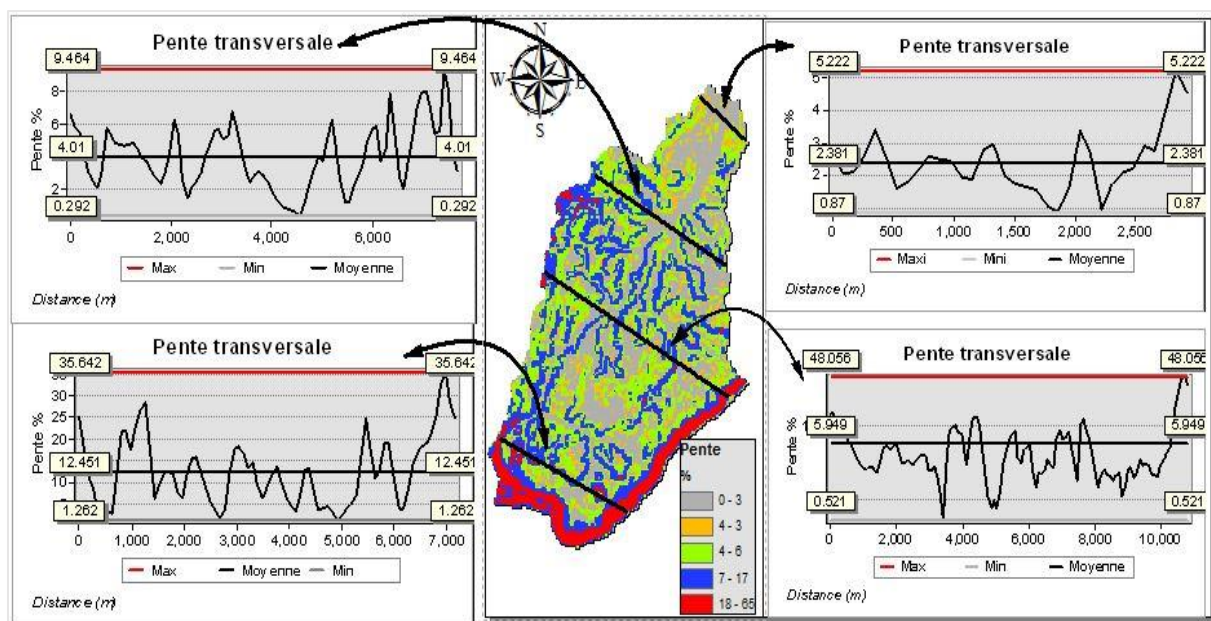


Figure 34. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Niogola

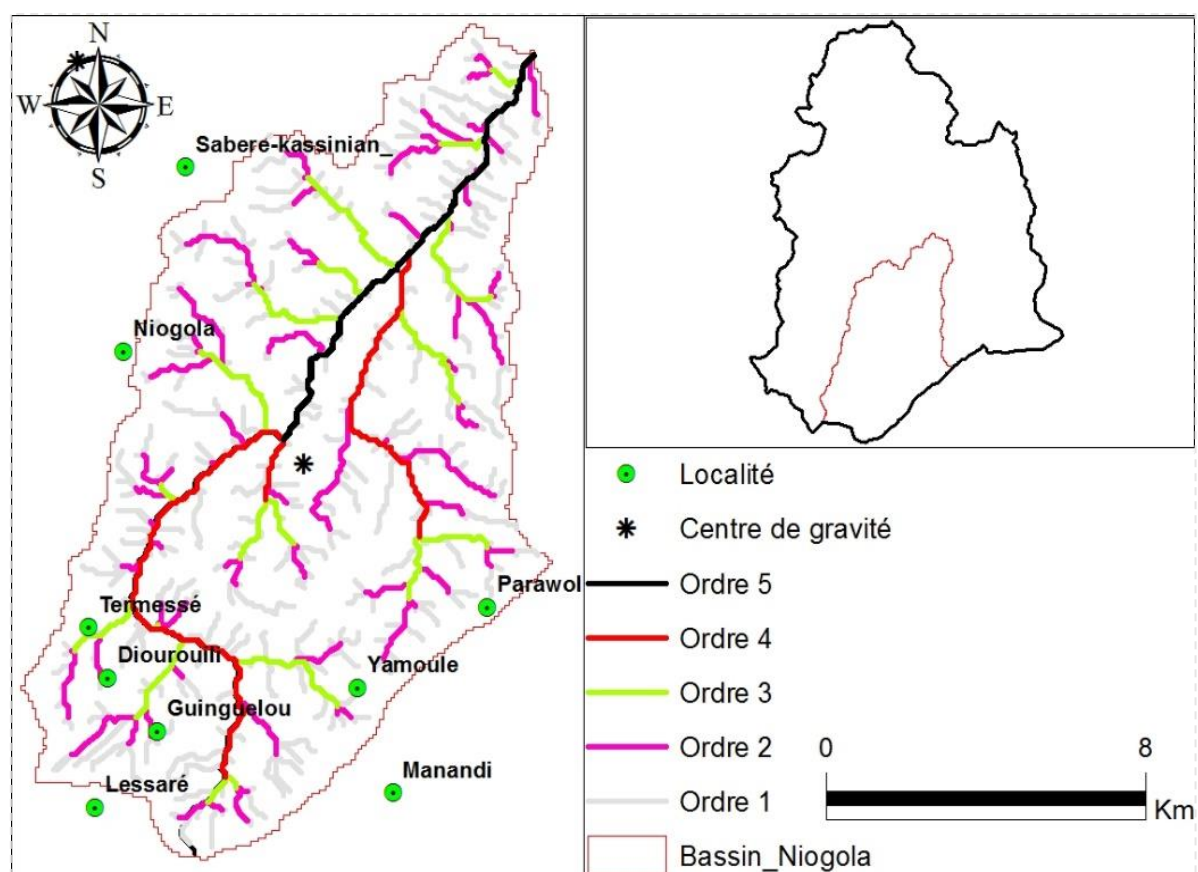


Figure 35. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Niogola.

III.1.1.2.1. Morphopédologie du bassin versant du Niogola

Le bassin du Niogola est couvert par quatre (4) classes de sols (Fig. 36). Il s'agit des faciès :

- de sols ferrallitiques et sols hydromorphes, qui occupent une superficie de 50 km² soit 32% de la superficie totale du bassin ;
- de sols ferrallitiques et sols peu évolués (46%) ;
- de sols hydromorphes et sols peu évolués organiques (8%) ;
- et de sols squelettiques d'affleurement de cuirasses et d'éboulis sur cuirasse (14%).

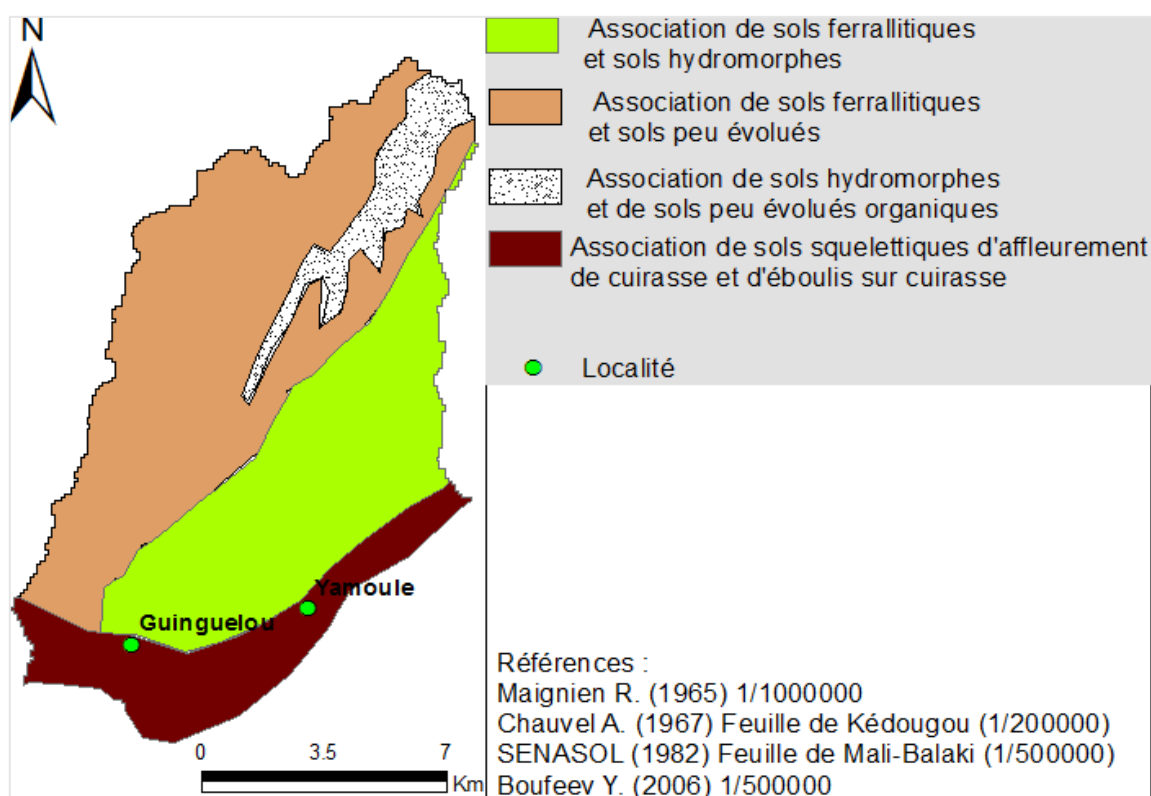


Figure 36. Bassin du Niogola – Carte morphopédologique.

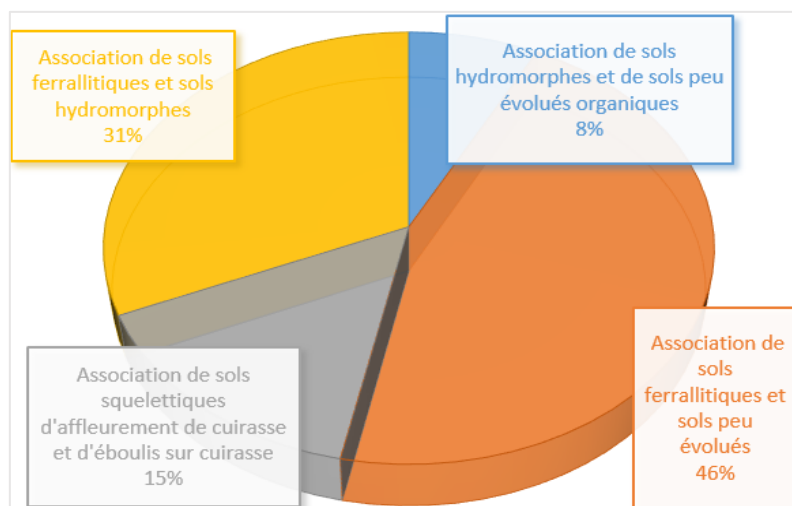


Figure 37. Bassin du Niogola – statistiques des unités pédologiques

III.1.1.2.2. Occupation des sols du bassin versant du Niogola

Le bassin du Niogola est marqué par six (6) classes d'occupation des sols (Fig.38). Il s'agit de la forêt galerie, la savane arborée, les cuirasses latéritiques, les zones de cultures, les bas-fonds non exploités et l'eau.

L'analyse des unités d'occupation des sols du bassin du Niogola (Fig.39) montre la prédominance de la couverture végétale, qui occupe 44% de la superficie du bassin. La forêt galerie est la formation la plus répandue avec 67% du paysage végétal total et 29% de la superficie du bassin ; tandis que la savane arborée n'occupe que 33% de la couverture végétale totale et 15% du bassin.

Les zones agricoles occupent une superficie de 6.34 km² soit 4% du bassin et 21% de la superficie totale des bas-fonds (Fig.39).

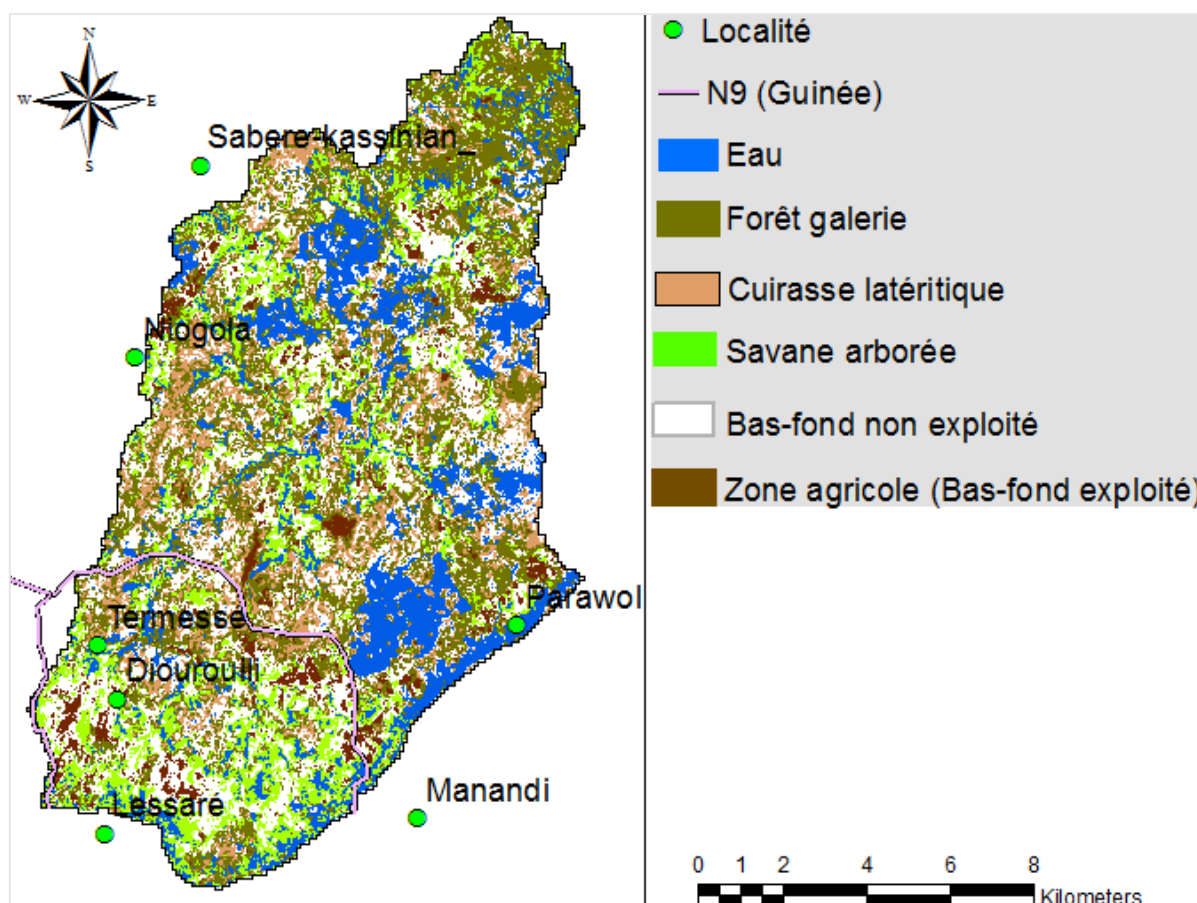


Figure 38. Bassin du Niogola – Carte d'occupation des sols.

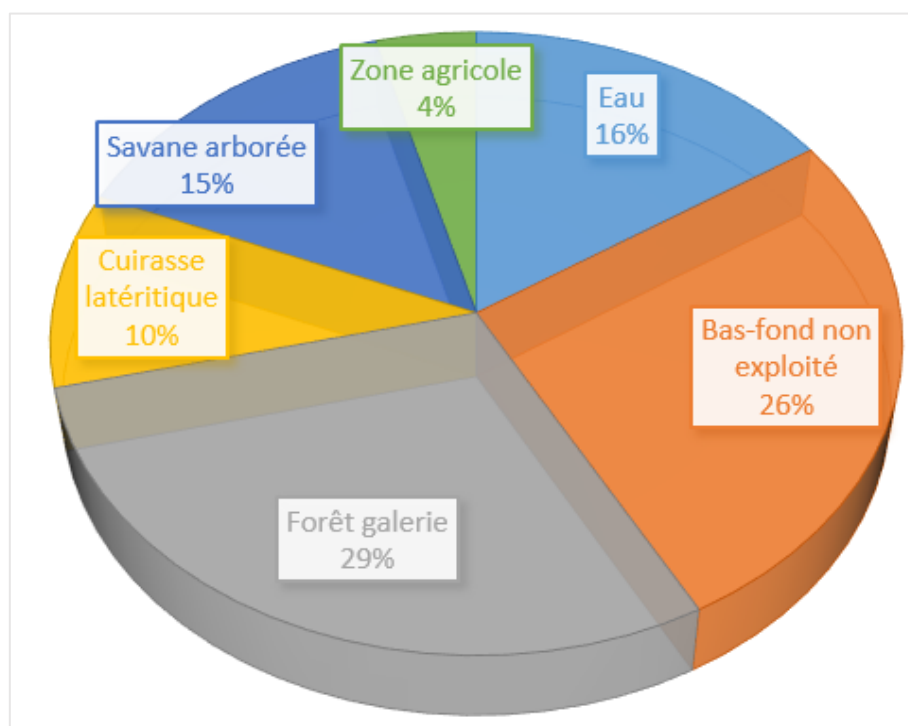


Figure 39. Proportion des unités d'occupation des sols du bassin de Niogola.

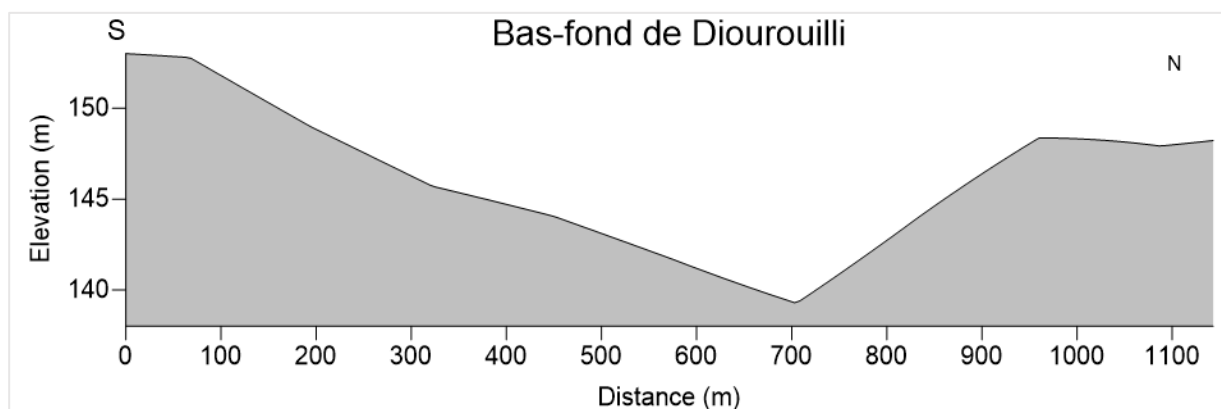
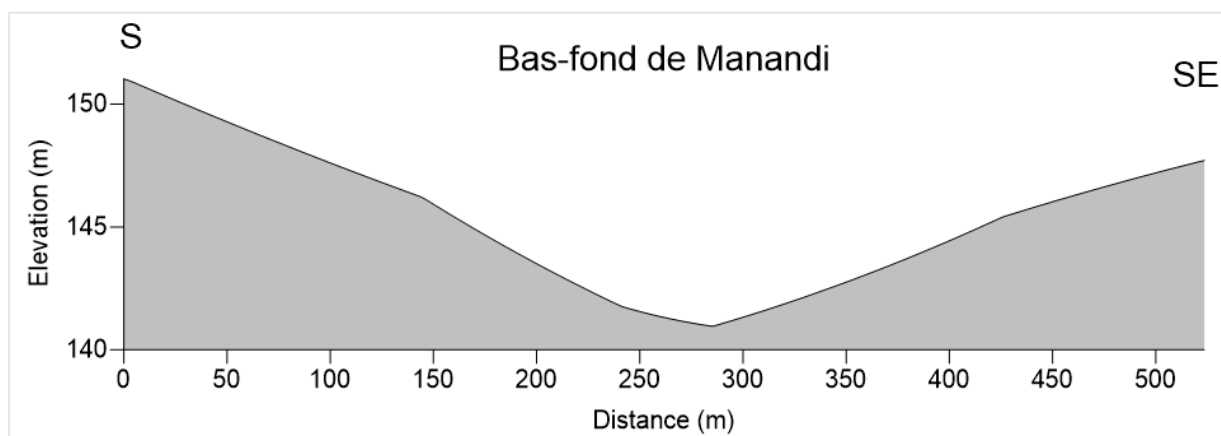
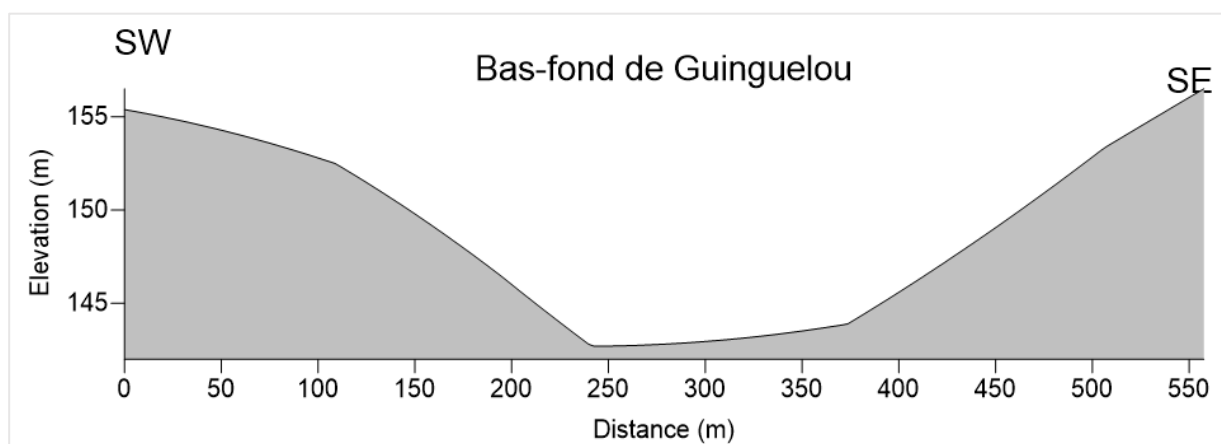
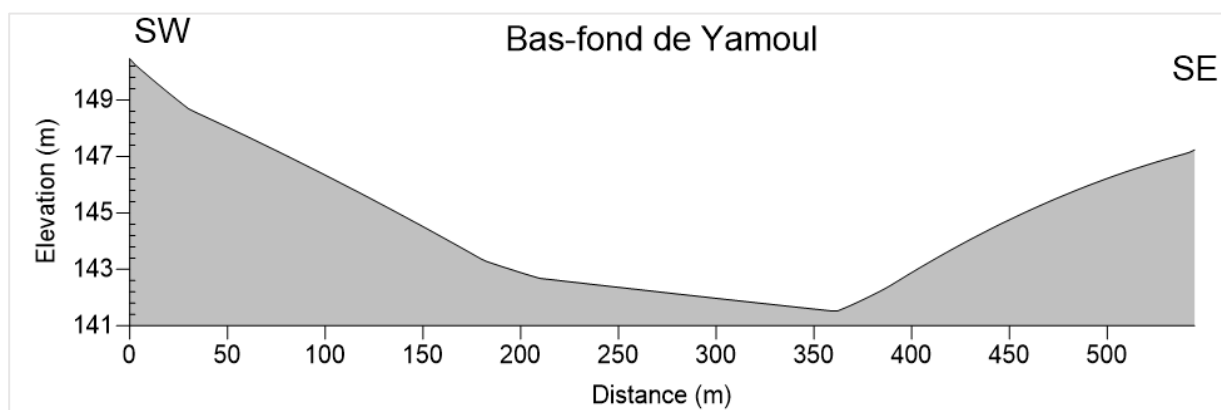
III.1.1.2.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin du Niogola

Au total, il a été recensé 41.2 km² de zones inondables sur le bassin du Niogola. Elles sont localisées le long de la rivière du Niogola et de ses affluents. Il s'agit des bas-fonds des sites de Niogola, Parawol et de Sabéré.

Le site du village de Niogola dans la partie la plus en amont du bassin versant du Niogola est organisé autour des bas-fonds de Guinguelou, Yamoule, Diouroulli et Manandi. Ces bas-fonds couvrent une superficie totale de 27 km². Ils sont exploités par les populations de ces localités et des villages voisins. Entaillés dans les formations infracambriennes du socle, ces bas-fonds se situent entre 100 et 205 m d'altitude ; Les pentes les plus fortes sont localisées sur les versants sud, sud-ouest et sud-est des bas-fonds (Tab.17).

Tableau 17. Morphométrie des bas-fonds du site de Niogola

Nom du Bas-fond	S. [km ²]	L. [km]	Forme	Ramification	Alt. min [m]	Alt. max [m]	Pente des versants (%)
Guinguelou	2,0	2,5	Font plat	Ordre 3	133	205	SW (188%) ; SE (33%)
Yamoule	5,5	2,2	Font plat	Ordre 3	138	205	SW (172%) ; SE (32,3%)
Niogola	15	7,5	Concave	Ordre 4	100	181	NW (14,5%) ; E (3,3%)
Manandi	1,2	2,3	Concave	Ordre 3	138	205	S (180,7%) ; SE (32,5%)
Diouroulli	3,3	4,1	Concave	Ordre 3	125	205	S (78,6%) ; N (16,6%)



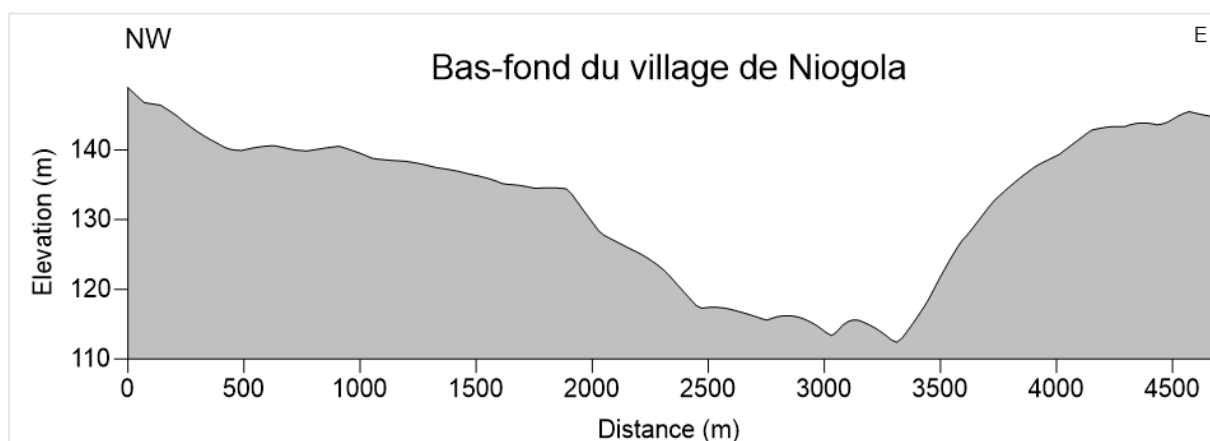


Figure 40. Profils en travers des bas-fonds du site de Niogola

Le bas-fond du village de Parawol à l'est du bassin du Niogola couvre 9 km² de zones inondables qui s'étirent sur 8,2 km de long et 1,1 km de large. Il s'agit d'un bas-fond d'ordre 4, de forme concave qui est connecté à la rivière de Niogola à la cote 101 m, pendant la saison pluvieuse. Entaillé dans les grès du massif de Parawol, ce bas-fond se caractérise par des versants à pentes fortes qui varient de 16,25% (versant NW) à 5,15% (versant NE) (Fig.41).

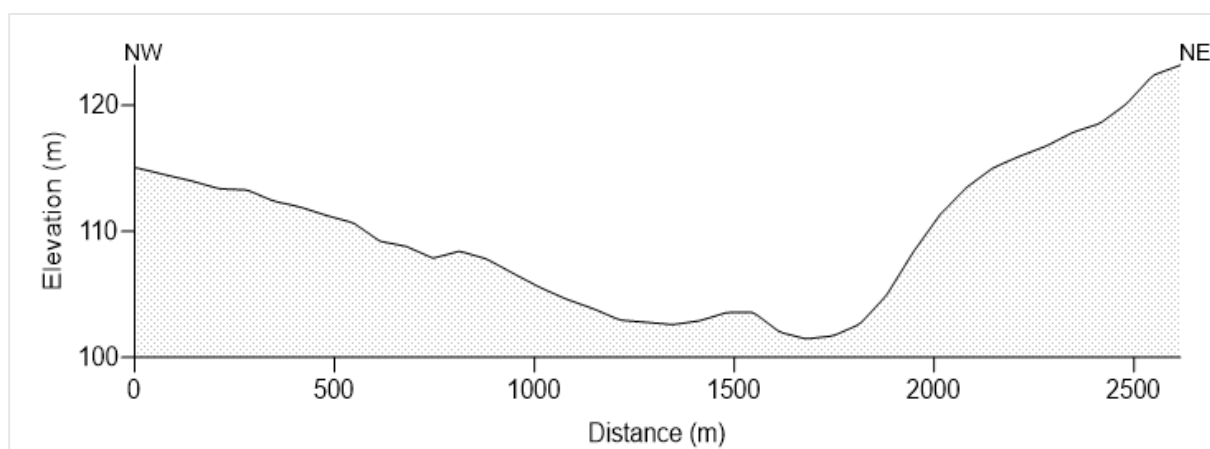


Figure 41. Profil en travers du bas-fond du village de Parawol

Le site de Sabéré, au nord-ouest du bassin du Niogola, couvre une superficie totale de 5,2 km². Il s'agit de bas-fonds d'ordre 3, qui s'étirent sur 4,3 km de long et 1,2 km de large. Les altitudes varient de 170 m (amont) à 103 m (aval) et les pentes de 62,5% (versant sud) à 5,45% (versant SSE) (Fig.41).

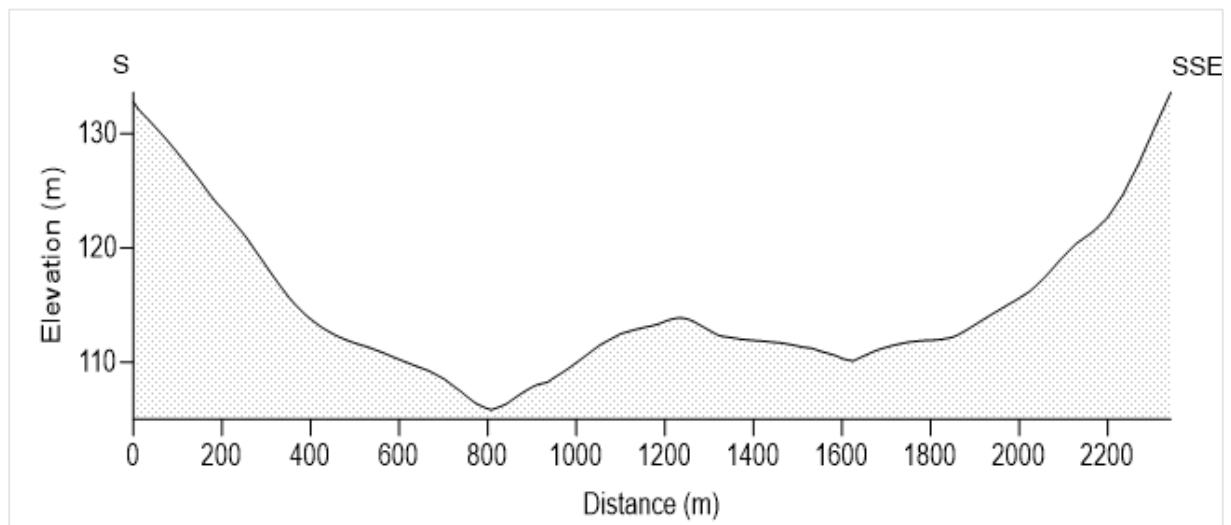


Figure 41. Profil en travers du bas-fond de Sabéré.

III.1.1.3. Le bassin versant du Bilèle

Situé entre 12°33' et 12°36' nord et entre 12°45' et 12°48' ouest, le bassin versant du Bilèle couvre une superficie de 19.7 km² et un périmètre de 22.6 km. Il parcourt environ 10.1 km d'amont (ouest) en aval (est). Le bassin se trouve entièrement dans le département de Salémata, au nord-ouest du Diarha.

Sa structure géomorphologique est constituée essentiellement d'une succession de buttes témoins, de glacis cuirassés et de terrasses (Fig.42). Les altitudes passent de 233 m à Koté, à 63 m à sa confluence avec le Diarha.

Les principaux reliefs du bassin sont constitués par les collines Bassari qui culminent à environ 235 m ; alors que les zones dépressionnaires (bas-fonds) n'excèdent que très rarement les 100 m d'altitude.

Tableau 18. Morphométrie de la topographie du bassin versant du Bilèle

Alt. Max	Alt. Min	Alt. Moy	ΔH	Alt. Médiane	Quartile 75%	Ip moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
233	63	140	170	139	177	38.3

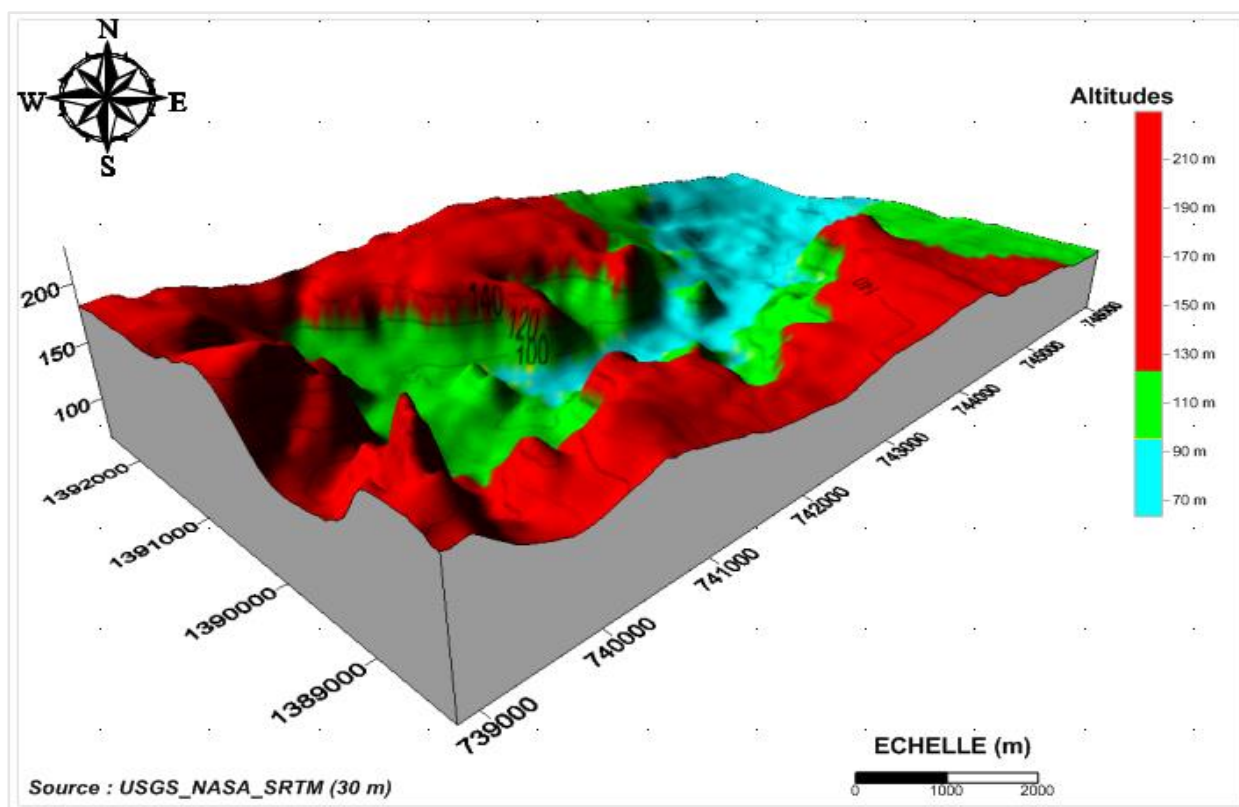


Figure 42. MNT 3D du bassin versant du Bilèle

L'analyse de la courbe hypsométrique du bassin révèle que :

- 1.5% de la superficie du bassin ont des altitudes supérieures à 200 m ;
- 65 % ont des altitudes comprises entre 100 et 200 m ;
- et 33.5% ont moins de 100 m d'altitude.

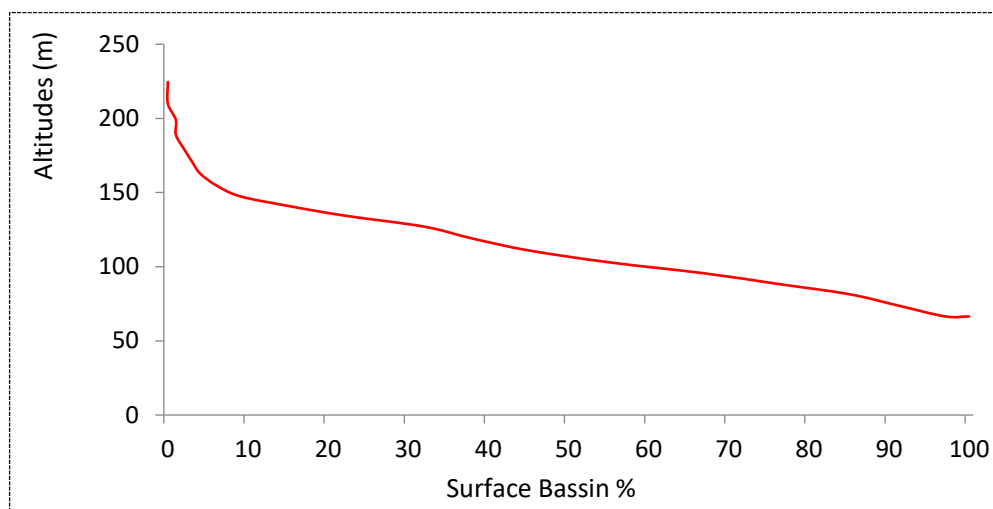


Figure 43. Courbe hypsométrique du bassin versant du Bilèle

Avec une forme assez allongée ($K_c = 1.4$), et de fortes pentes transversales (Fig.44), les eaux de ruissellement du Bilèle mettent environ 1h 06mn pour arriver à sa confluence avec le Diarha. La vitesse moyenne des flux est estimée à 11.2 m/km (Tab.19). En considérant uniquement la longueur du cours d'eau supérieur, la densité de drainage du marigot est d'environ 8.3 km/km².

Tableau 19. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Bilèle

Superficie	Périmètre	K_c	L	l	D	I_g	D_s	I_p Roche	L. talweg	Pente talweg	T_c
km ²	km		km	km	m	m/km	m		km	m/km	Heure
19.7	22.6	1.4	9.15	2.15	113	12.35	54.8	3.92	10.1	11.2	1.1

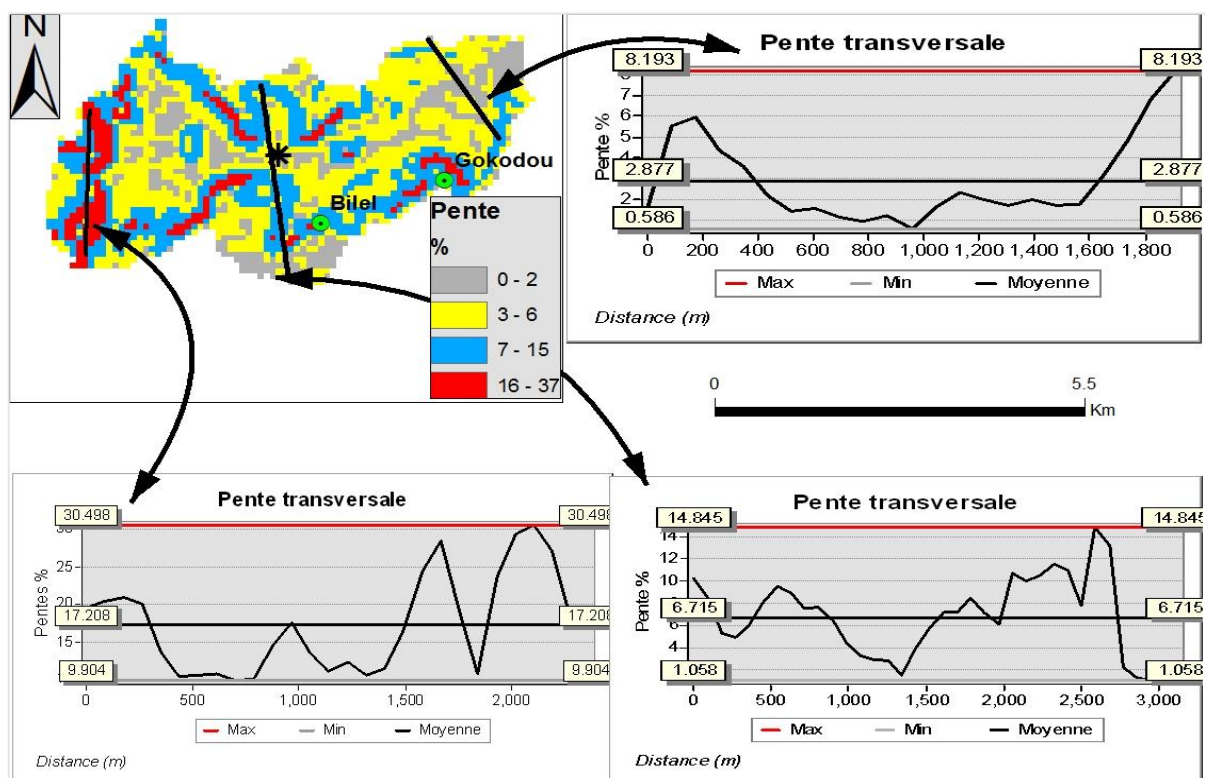


Figure 44. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Bilèle

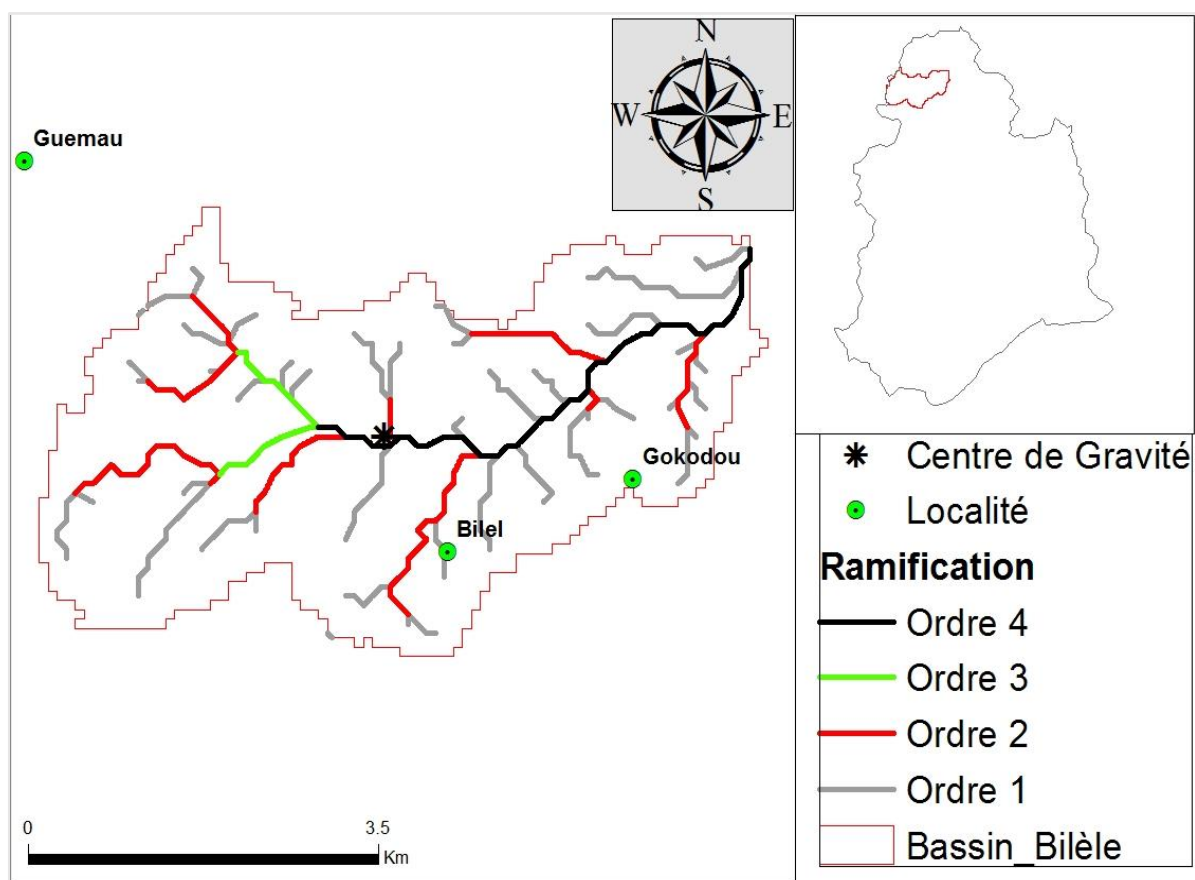


Figure 45. Hiérarchisation du réseau hydrographique du marigot de Bilèle

III.1.1.3.1. Morphopédologie du bassin versant du Bilèle

Trois (3) types de sols intéressent le bassin du Bilèle (Fig. 46). Il s'agit des lithosols sur cuirasse qui occupent 20 % de la superficie du bassin ; de l'ensemble lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravionnaire (56%) et des sols hydromorphes (24%).

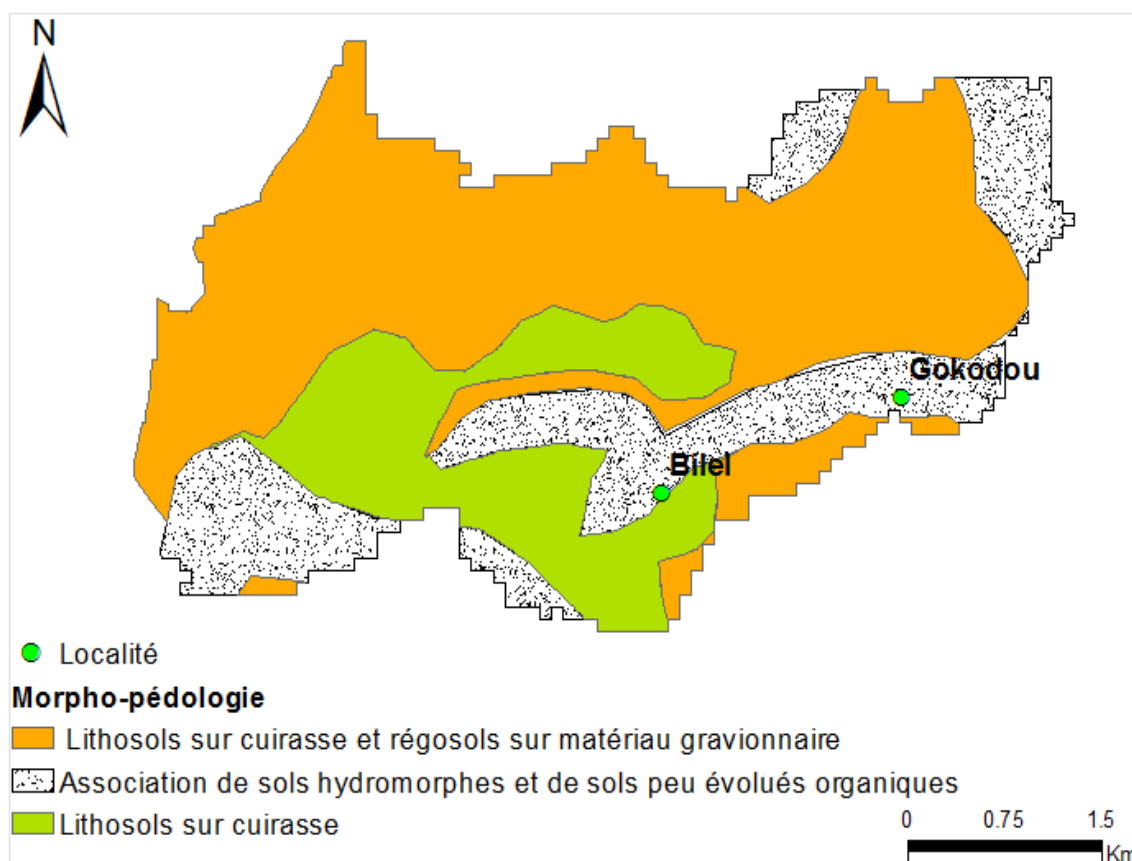


Figure 46. Bassin du Bilèle – Carte morphopédologique.

III.1.1.3.2. Occupation des sols du bassin versant du Bilèle

Six (6) unités d'occupation des sols ont été identifiées dans le bassin du Bilèle, suite à une classification orienté-objet (Fig.47). L'analyse des figures 47 et 48 montre que les bas-fonds constituent l'unité la plus répandue dans le paysage du bassin. Ils représentent à eux seuls 42% de sa superficie. Cette unité est suivie par les formations végétales (37%), la cuirasse latéritique (17%) et l'eau (4%).

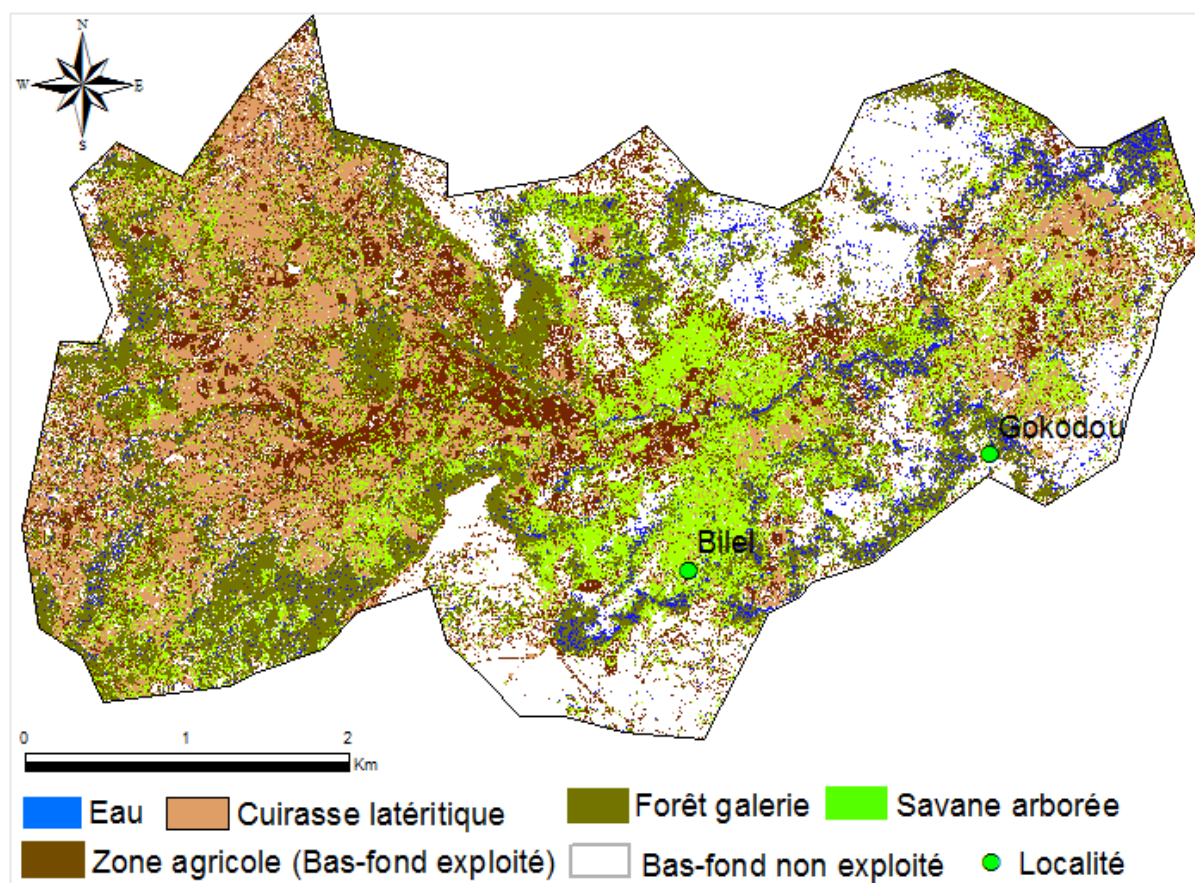


Figure 47. Bassin de Bilèle – Carte d’occupation des sols.

L’analyse de la figure 48 montre que les bas-fonds du Bilèle sont assez bien exploités : sur une superficie totale de 8.2 km², 3.2 km² soit plus de 38% sont mis en culture.

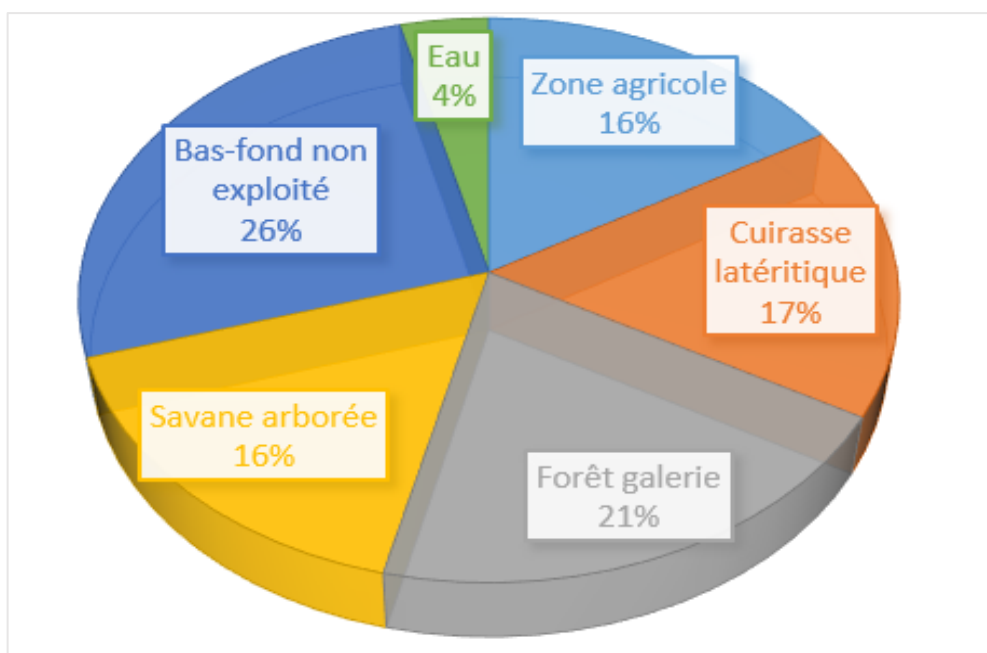


Figure 48. Proportion des unités d’occupation des sols du bassin du Bilèle.

III.1.1.3.2. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Bilèle

Le bassin du Bilèle contient 8.2 km² de zones inondables soit 42% de sa superficie. Ces zones inondables se localisent le long du Bilèle et de ses affluents. Il s'agit de zones de réception et de stockage des eaux de ruissellement des bassins élémentaires. On distingue trois zones correspondant aux bas-fonds du Bilèle.

La tête de bas-fond, qui se localise dans la partie amont, couvre une superficie de 1.2 km² et s'étire sur 1.6 km de long et 0.75 km de large. C'est le premier tronçon de bas-fond situé à 132 m d'altitude (Fig.49). Il est mal drainé, sans cours d'eau individualisé, les pentes y sont très fortes (8.2%). Il est organisé autour du village de Guémau.

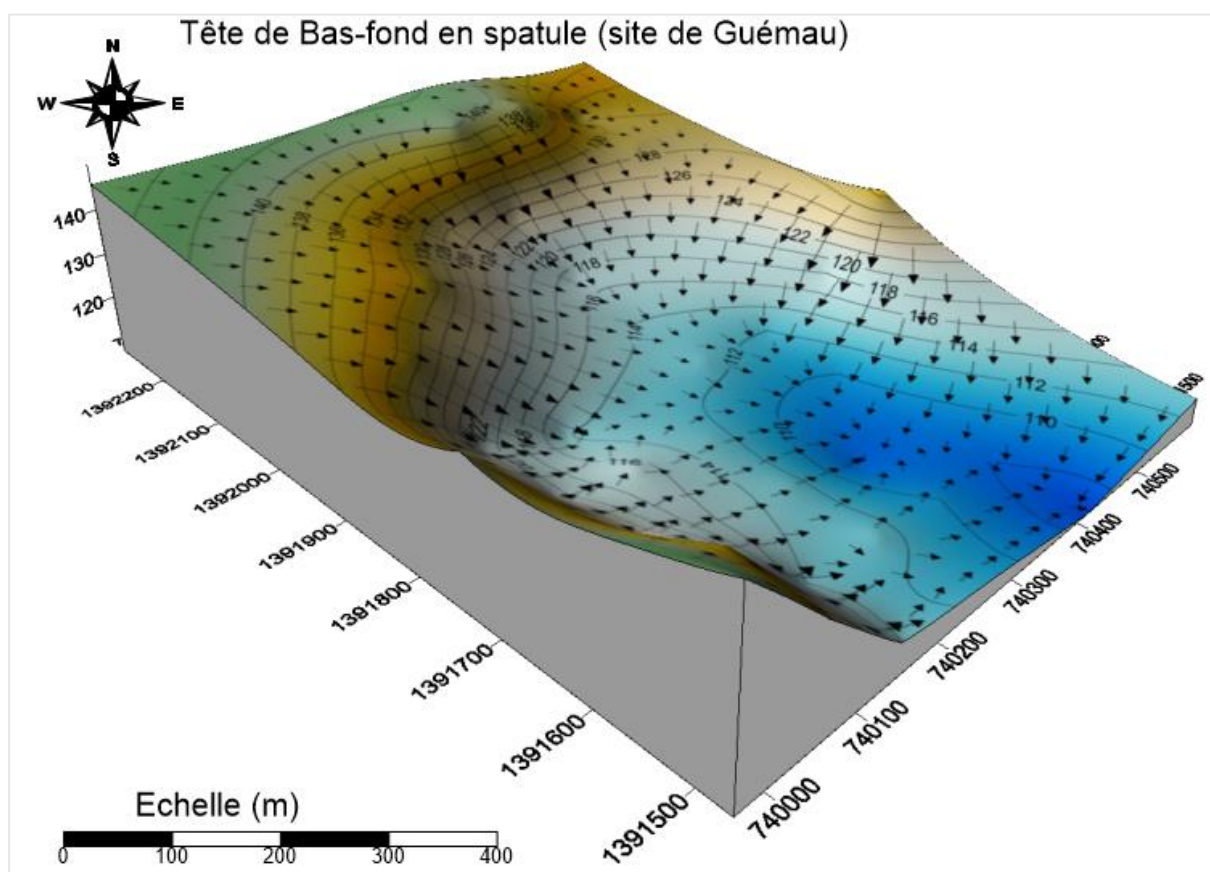


Figure 49. Profil 3D du premier tronçon (tête de bas-fond en spatule)

La partie centrale située dans le village de Bilèle est longue de 5.5 km et couvre 6.6 km². De pentes plus faibles (1.86%), elle est située à 115 m d'altitude, en contrebas du premier tronçon (Fig.50). Les sols argilo-sableux renferment des matériaux issus des versants. L'eau qui inonde le centre du bas-fond et qui peut persister jusqu'en début de saison sèche, provient de la nappe de surface. Raunet M. (1984) note la présence de deux nappes superposées dans cette partie :

une nappe profonde dans l'axe du bas-fond situé dans les altérites, elle provient des infiltrations sur les versants ; et une nappe d'eau libre qui se trouve perchée dans la couche superficielle argilo-sableuse plus ou moins perméable. Ces deux nappes superposées engendrent un ruissellement de surface qui se concentre dans le centre du bas-fond. Les ravines d'érosion venant des versants disparaissent dans la zone de raccordement et créent des zones d'inondation et d'écoulement de sub-surface (Planchon O., Fritsch E., et Valentin C., 1987, cité par Konaté L., 1997).

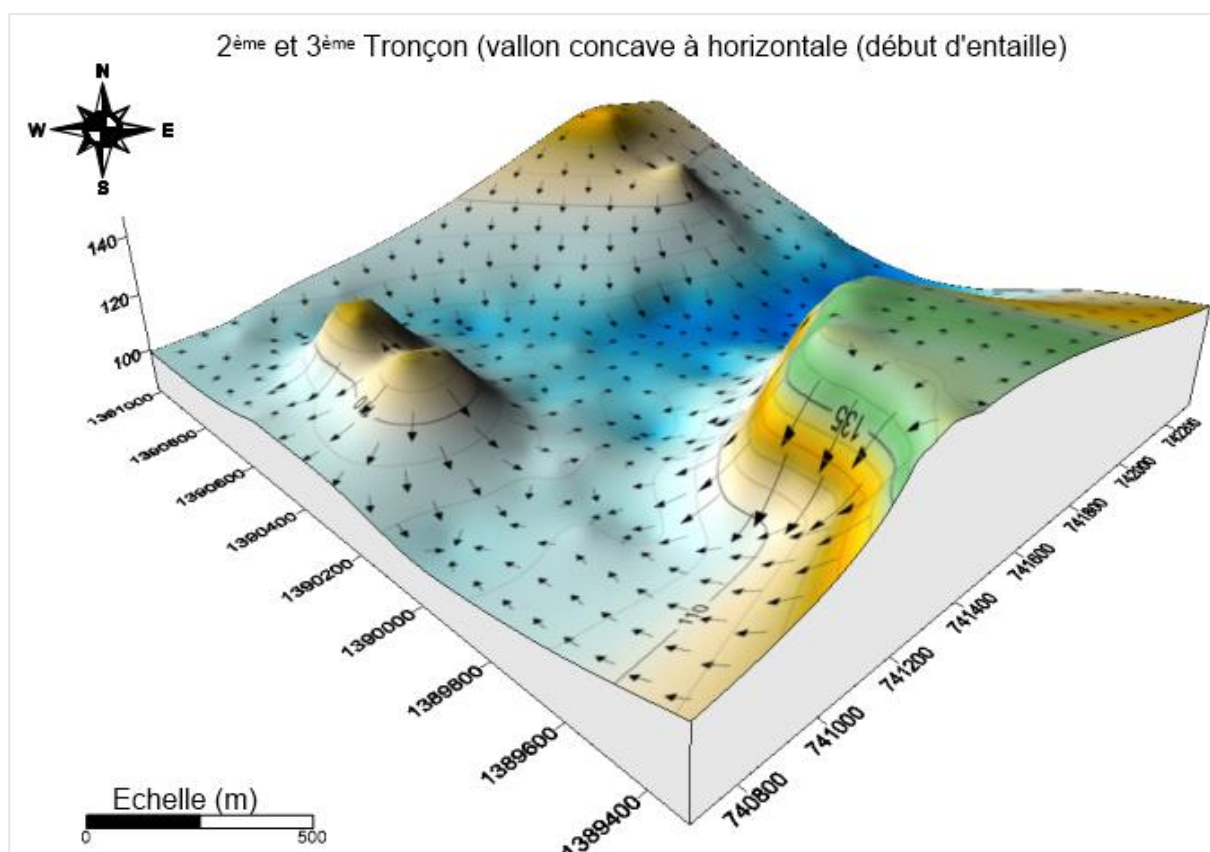


Figure 50. Profil en 3D du bas-fond de la partie centrale

La partie aval qui concerne le village de Gokodou couvre 0.55 km² pour 1.2 km de long. Elle constitue le quatrième tronçon du bas-fond. C'est un vallon à fond plat avec des flancs concaves. De pentes très faibles (1.47%), ces bas-fonds se situent à 70 m d'altitude (Fig.51).

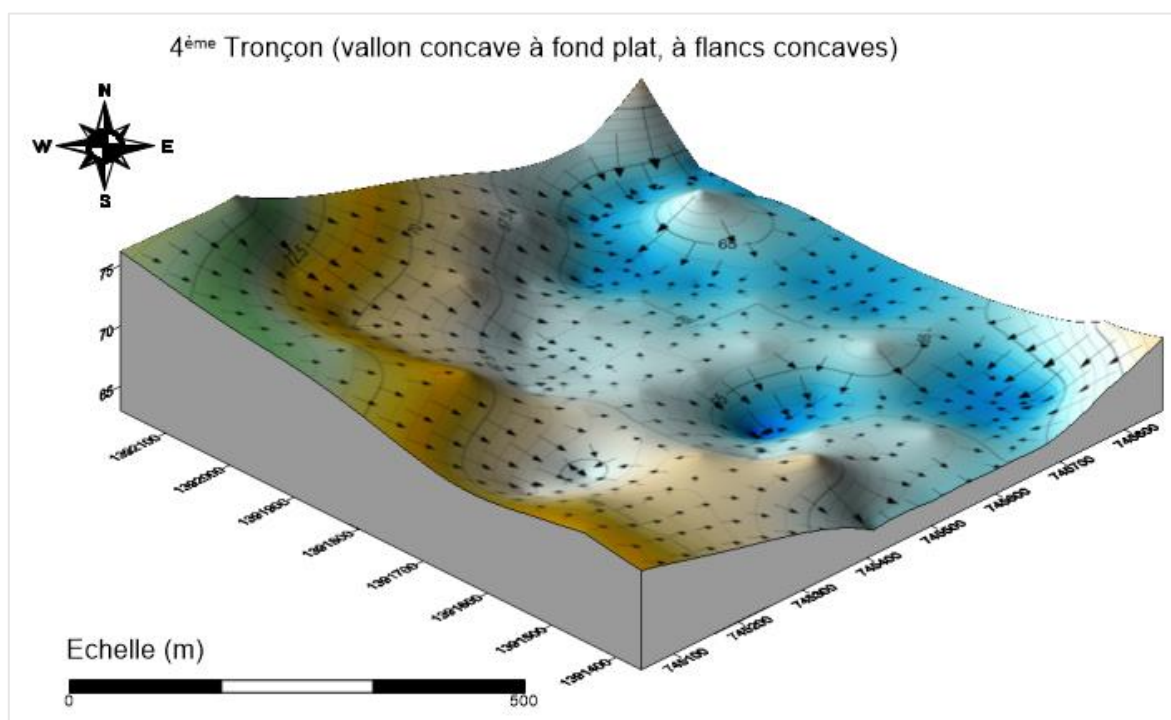


Figure 51. Profil en 3D du bas-fond de la partie avale

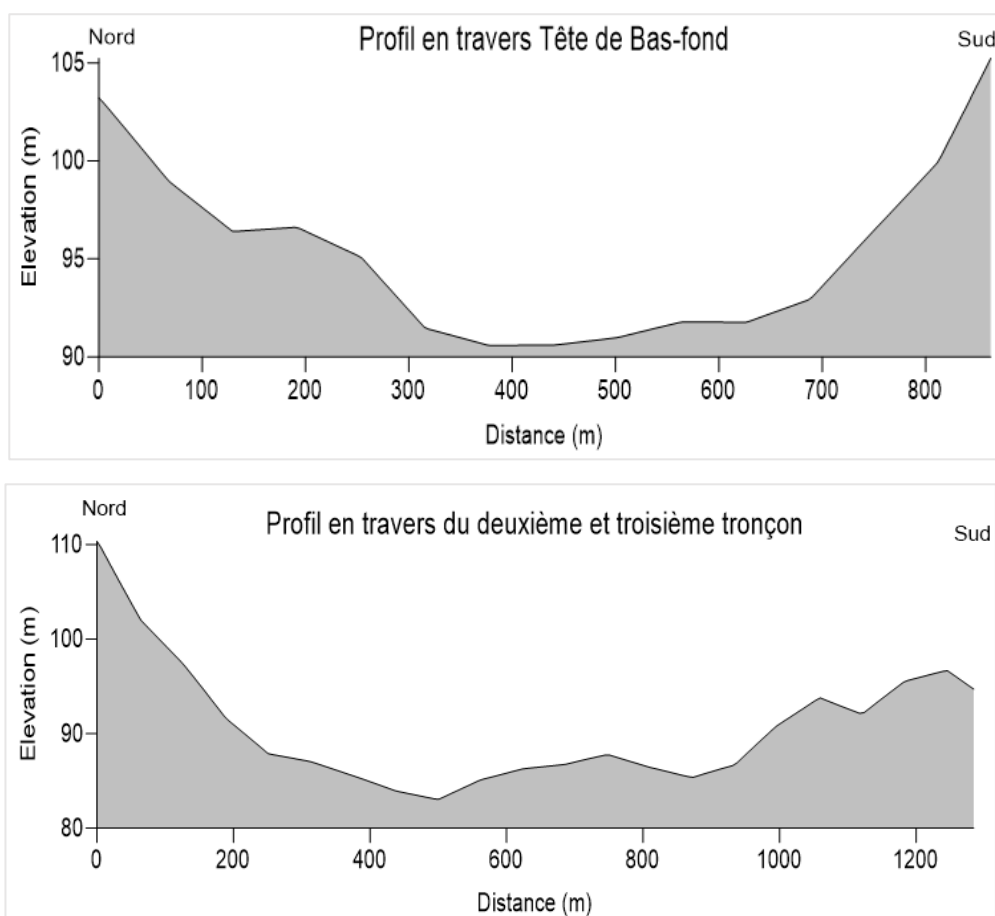


Figure 52. Profils en travers des trois premiers tronçons de bas-fonds du Bilèl.

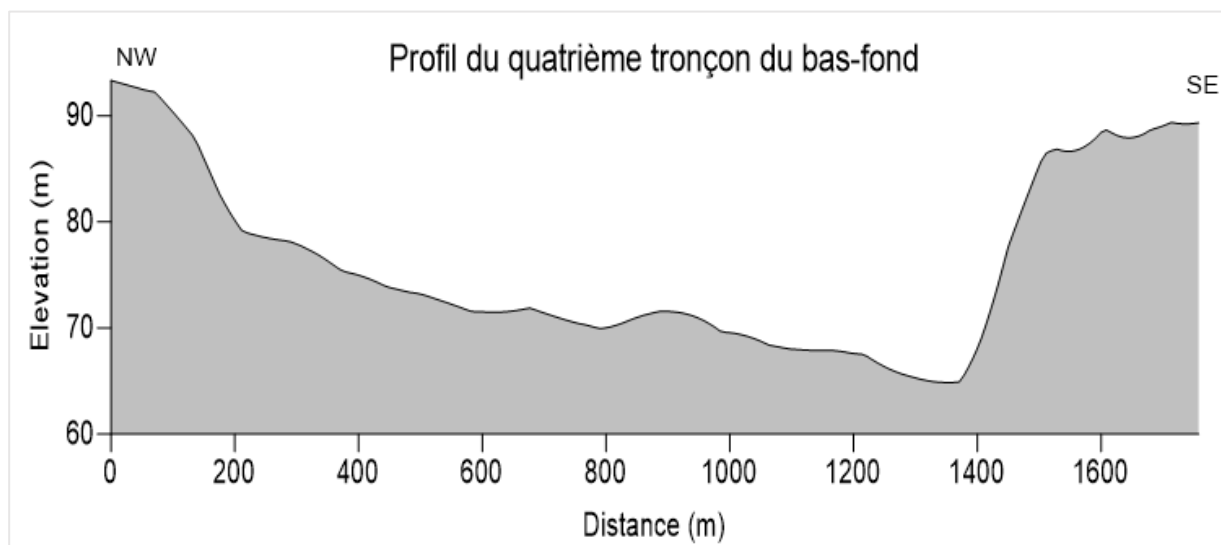


Figure 53. Profil en travers du quatrième tronçon du bas-fond du Bilèle.

III.1.2. Caractérisation des bassins de rive droite

III.1.2.1. Le bassin versant du Fangama

Situé entre les parallèles 12°18'30' et 12°26'30' et les méridiens 12°34'30' et 12°40'30', le bassin versant du Fangama couvre une superficie de 93.7 km² et un périmètre de 60.66 km. Le Fangama est orienté SE/NW et parcourt environ 20.6 km d'amont en aval. Il est né à la confluence de deux branches (affluents) : l'une issue de Parawol, au sud-ouest, et l'autre de Bayq, au sud-est du bassin (Fig.54). Ses principaux reliefs correspondent au prolongement des collines Bassaris en Guinée où les altitudes peuvent dépasser, par endroit, 500 m (Fig.55). Le tableau 20 indique la synthèse des caractéristiques altitudinales du bassin du Fangama.

Tableau 20. Morphométrie de la topographie du bassin du Fangama

Alt. Max	Alt. Min	Alt. Moy	ΔH	Alt. Médiane	Quartile 75%	Ip moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
555	88	290	467	284,5	382,75	48,2

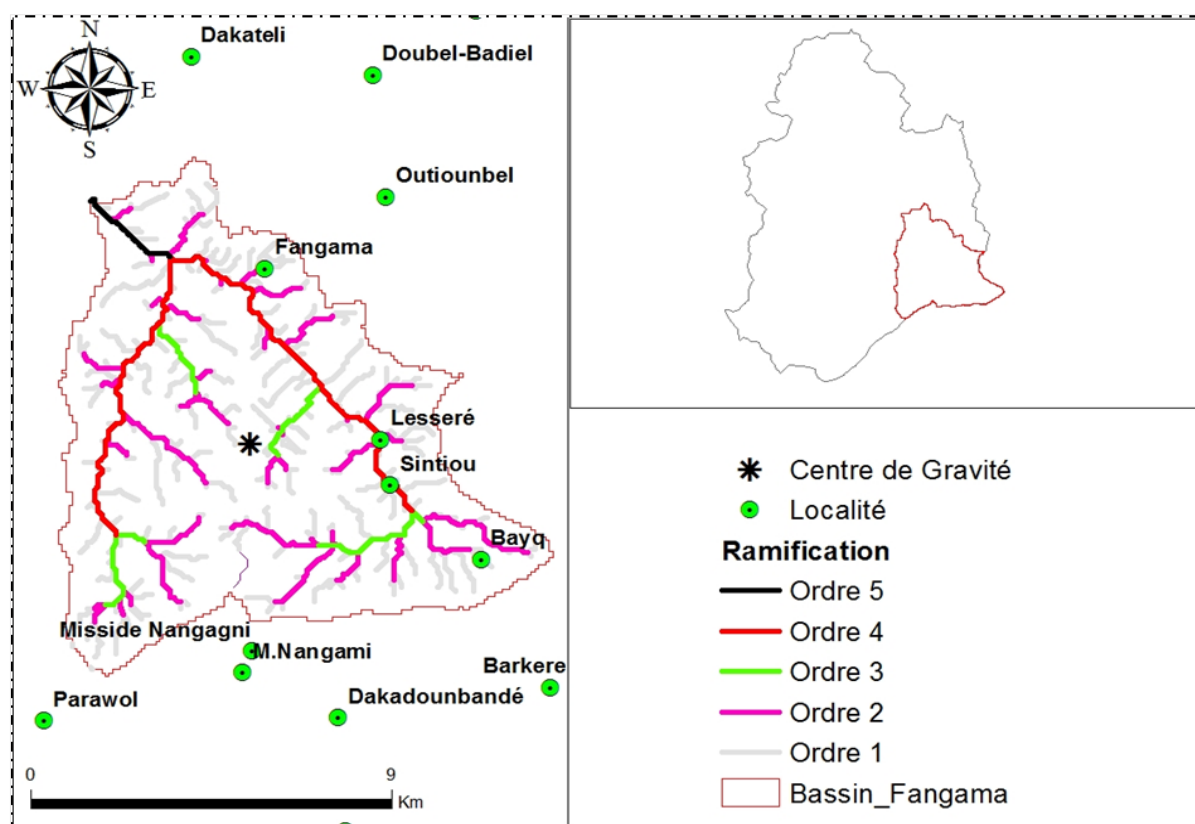


Figure 54. Hiérarchisation du réseau hydrographique du marigot de Fangama

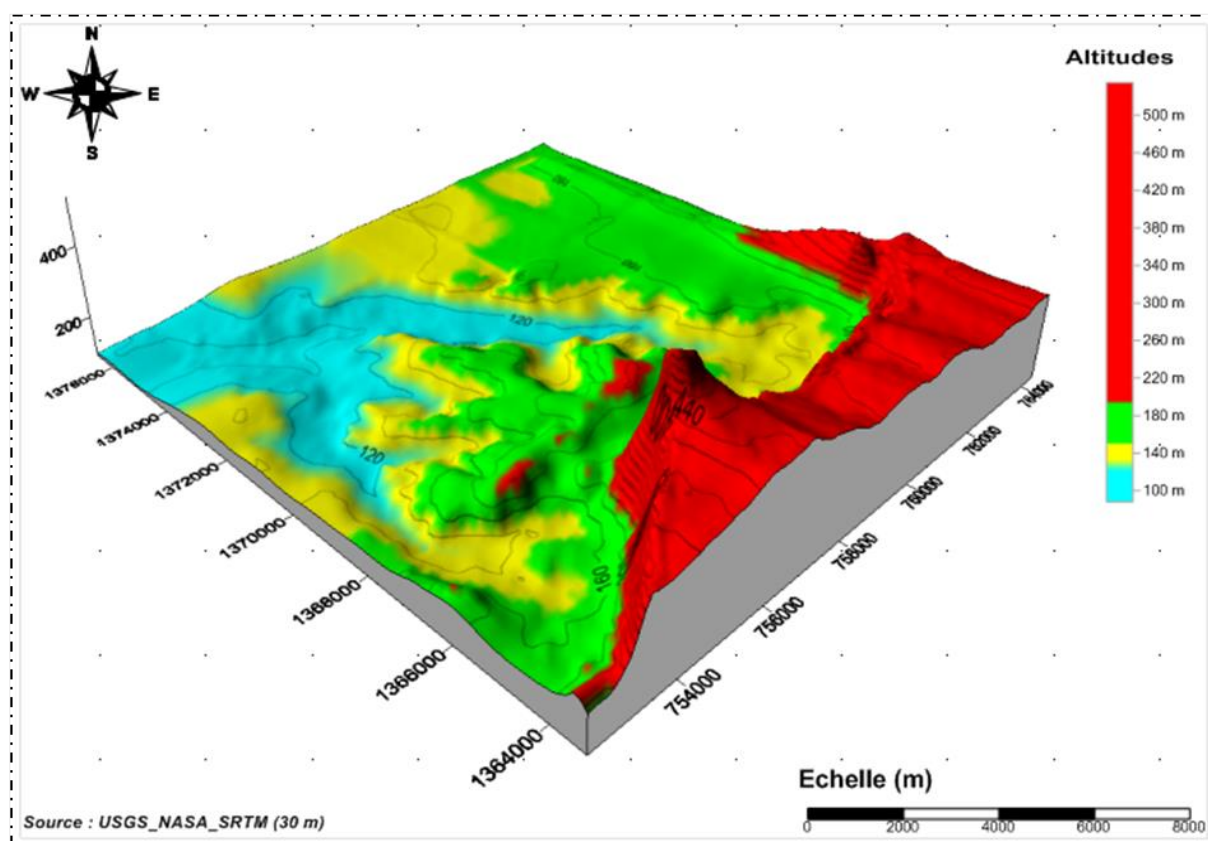


Figure 55. MNT 3D du bassin versant du Fangama.

L'analyse de sa courbe hypsométrique montre que :

- ✓ 8% de la superficie du bassin ont des altitudes supérieures à 300 m ;
- ✓ 30% entre 200 et 300 m ;
- ✓ et 62% ont des altitudes inférieures à 200 m ; ce qui révèle l'hétérogénéité de la topographie du bassin.

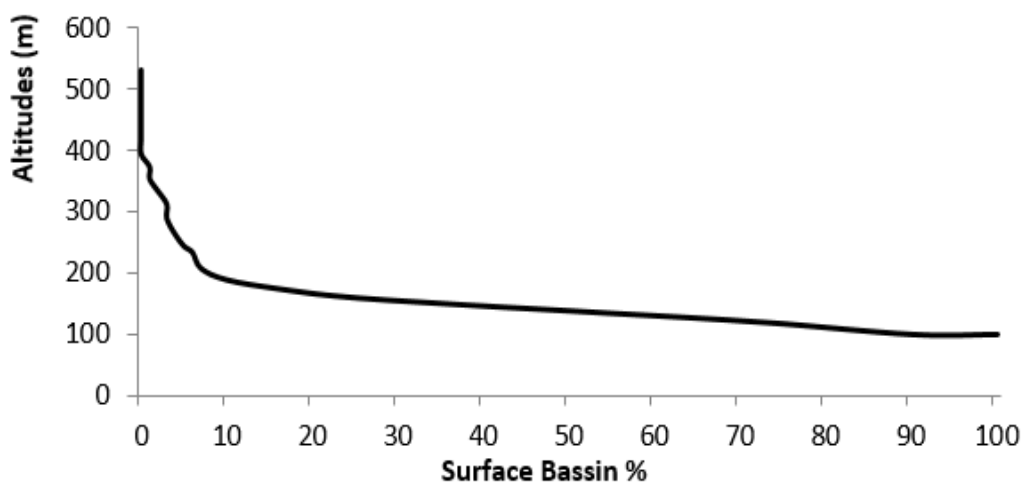


Figure 56. Courbe hypsométrique du bassin versant du Fangama

Avec une forme assez allongée ($K_c = 1.7$) et des pentes fortes (Fig.57), les eaux de ruissellement mettent environ 2h 42 mn pour arriver à sa confluence avec le Niogola. La densité de drainage est de 15 km/km². Elle a été calculée en intégrant les longueurs de tous les embranchements du cours d'eau auxquelles on divise par la superficie totale du bassin versant.

Tableau 21. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Fangama

Superficie	Périmètre	K_c	L	l	D	I_g	D_s	I_p Roche	L. talweg	Pente talweg	T_c
km ²	km		km	km	m	m/km	m		Km	m/km	Heure
93,7	60,66	1,75	26,8	3,5	189,0	7,0	68,2	3,0	20,6	9,2	2,7

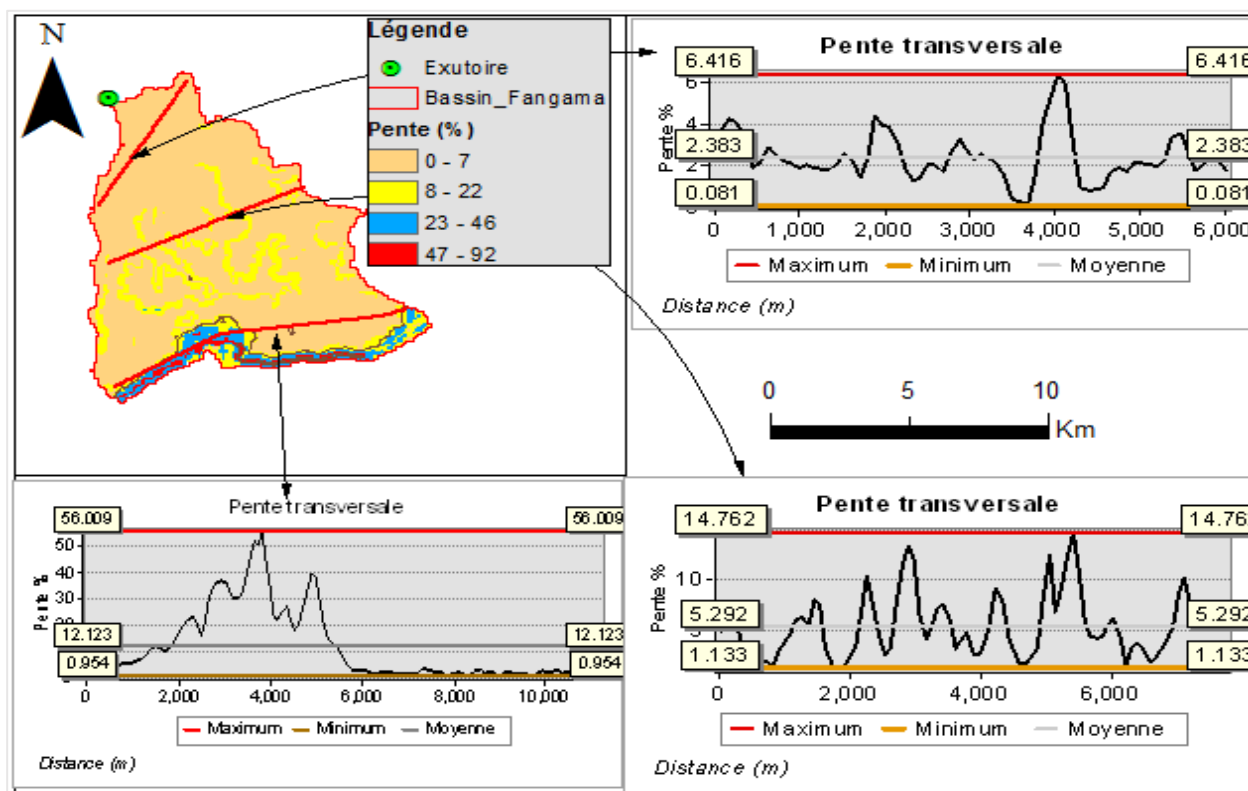


Figure 57. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Fangama

III.1.2.1.1. Morphopédologie du bassin versant du Fangama

Le bassin du Fangama est marqué essentiellement par trois (3) ensembles de sols, lesquels s'établissent à des niveaux topographiques différents (Fig.58). Il s'agit des associations :

- de sols hydromorphes et sols peu évolués organiques, qui s'établissent sur les bas-fonds. Cette classe de sols occupe une superficie de 10 km², soit 11% de la superficie du bassin ;
- de sols squelettiques d'affleurement de cuirasse et d'éboulis sur cuirasse, qui se localisent sur les plateaux cuirassés. Cet ensemble se situe en amont du bassin du Fangama, sur les massifs du Fouta Djallon méridional. Il occupe une superficie de 17 km² soit 19% du bassin ;
- de sols ferrallitiques et sols hydromorphes qui se situent sur les versants et les glacis d'épandage. Cet ensemble est le plus répandu dans le bassin : il occupe une superficie de 64 km² soit 70% du bassin (Fig.59).

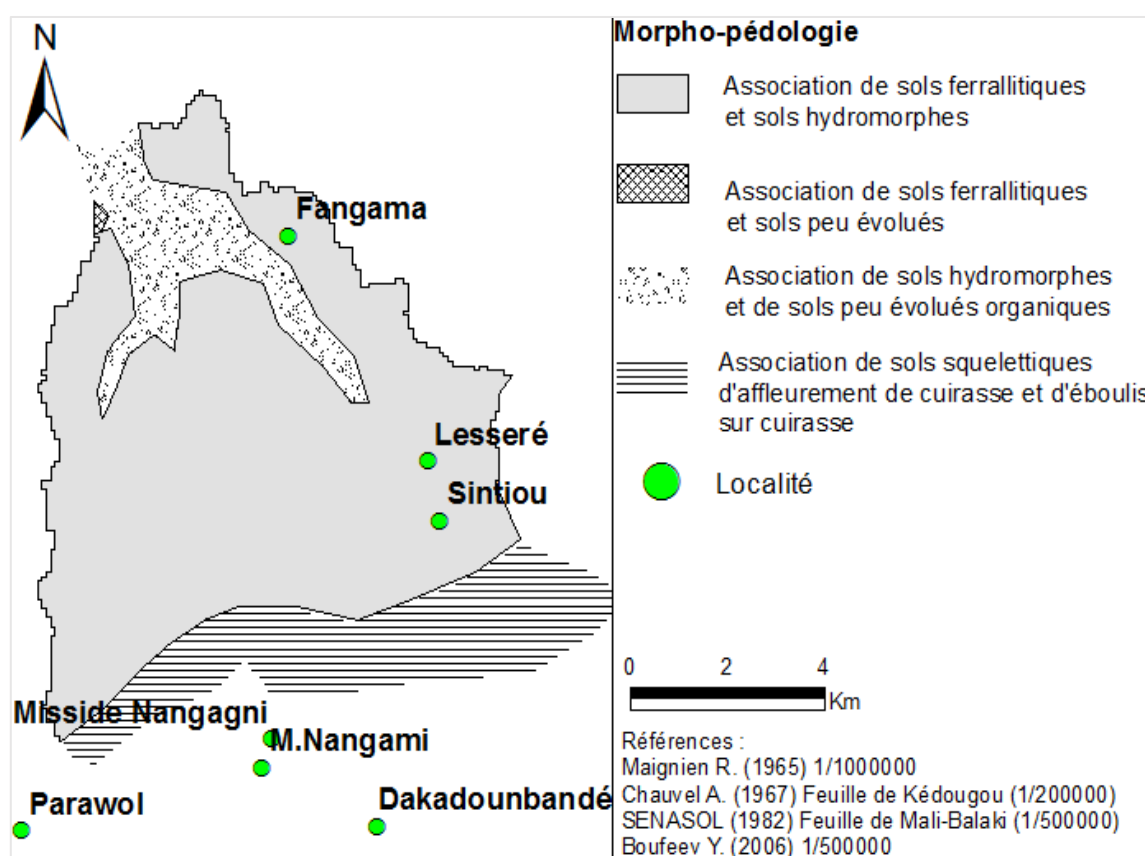


Figure 58. Bassin du Fangama – Carte morpho-pédologique.

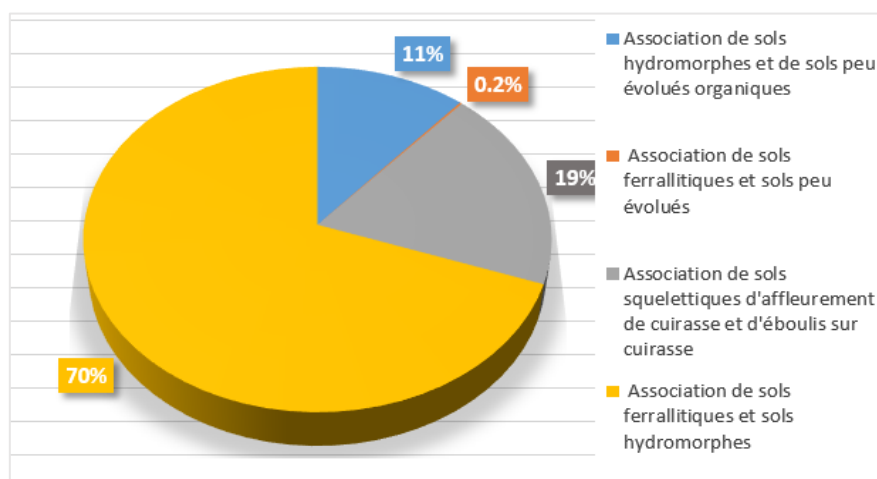


Figure 59. Bassin du Fangama – Pourcentages des différents ensembles de sols.

III.1.2.1.2. Occupation des sols du bassin versant du Fangama

L'analyse des unités paysagères du bassin du Fangama montre que les bas-fonds constituent les formations les plus répandues. Ils occupent une superficie totale de 50 km², soit 53% de la superficie du bassin – un fort potentiel en bas-fonds aménageables – mais, à peine 23% de leur superficie sont mises en culture. Cette unité est suivie par les formations végétales, constituées par la forêt sèche et la forêt galerie (Fig.60-61).

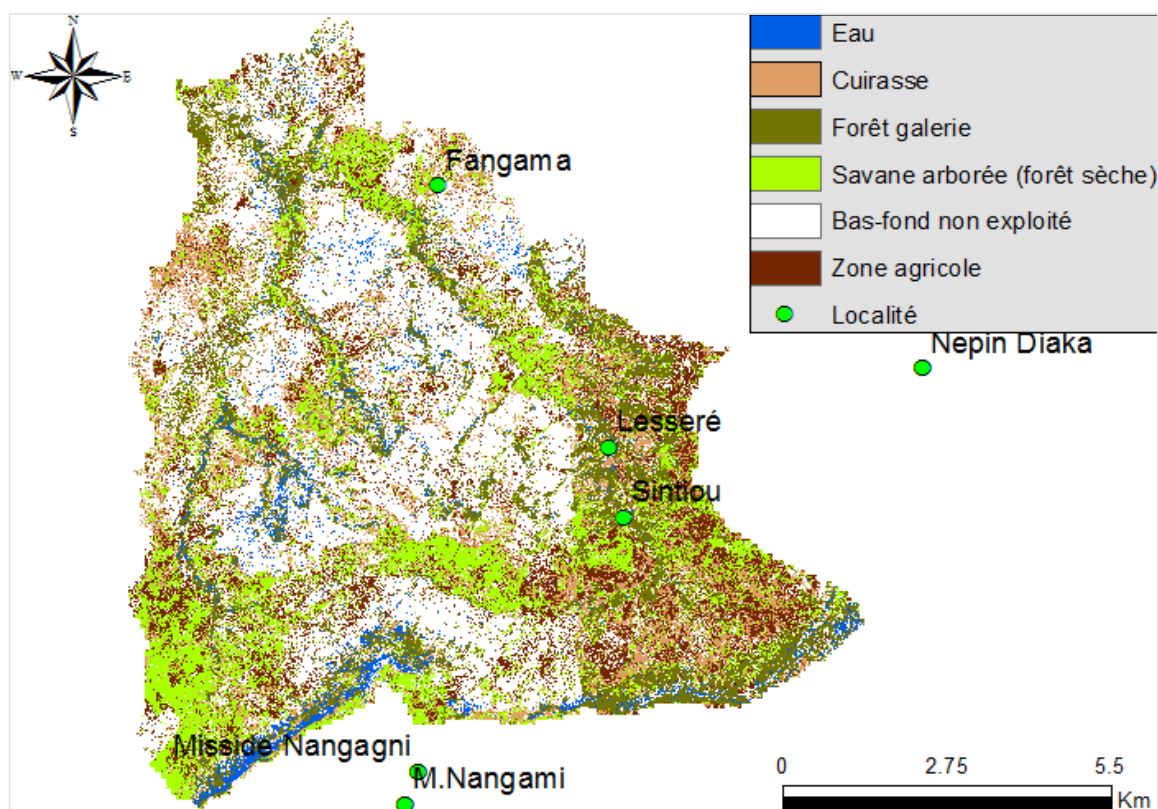


Figure 60. Bassin du Fangama – Carte d'occupation des sols.

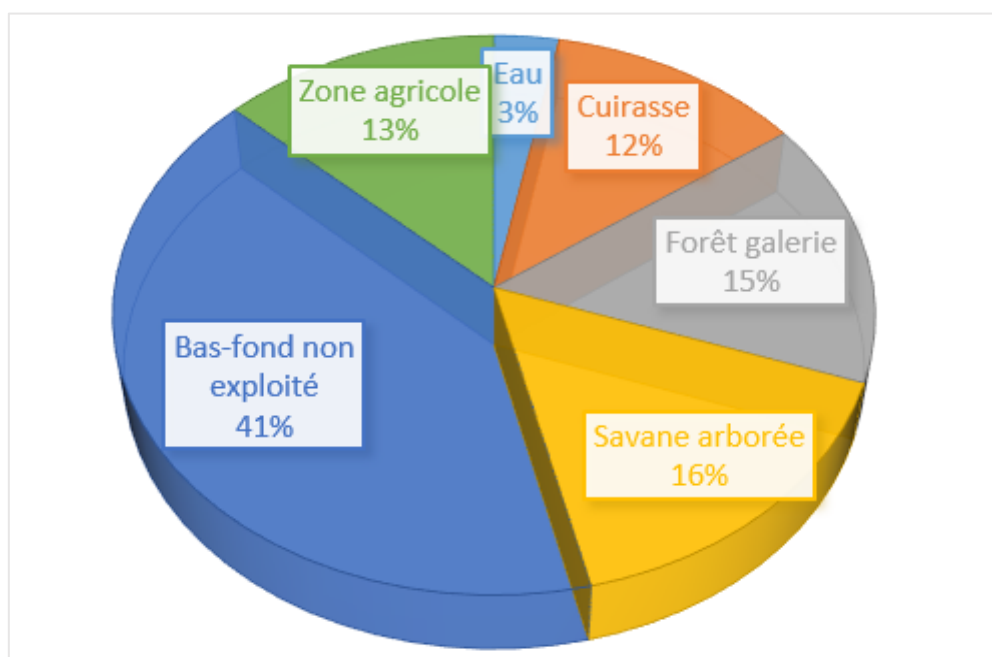


Figure 61. Bassin du Fangama – Pourcentages des unités d'occupation des sols.

III.1.2.1.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Fangama

Au total, il a été recensé 50 km² de zones inondables dans le bassin versant du Fangama. Ces bas-fonds se localisent le long de son réseau hydrographique et de ses affluents, mais aussi en contrebas des glacis d'épandage. Ils se répartissent entre deux sites : le bas-fond de l'axe Sintiou-Bayq (Guinée) et celui du village de Fangama.

Le bas-fond de l'axe Sintiou-Bayq (Guinée) couvre 27,5 km². Entaillé aux pieds des falaises de grès quartzites de Sintiou et de Bayq, ce bas-fond se caractérise par une forme concave, à fond plat. Il se situe entre 90 et 155 m d'altitude. Ses versants sont rectilignes dans le secteur SW, et convexo-concaves dans le secteur NE, avec des pentes qui varie de 28% (versant SW) à 9,9 % (versant NE) (Fig.62). Ce bas-fond constitue un réceptacle des eaux de ruissellement issues des versants – des crues de la rivière de Fangama et de ses affluents – ce qui fait qu'il est facilement inondé pendant la saison des pluies. Ce type de bas-fond se prêtent bien à l'agriculture irriguée et à des cultures de décrues ou supportant l'inondation passagère.

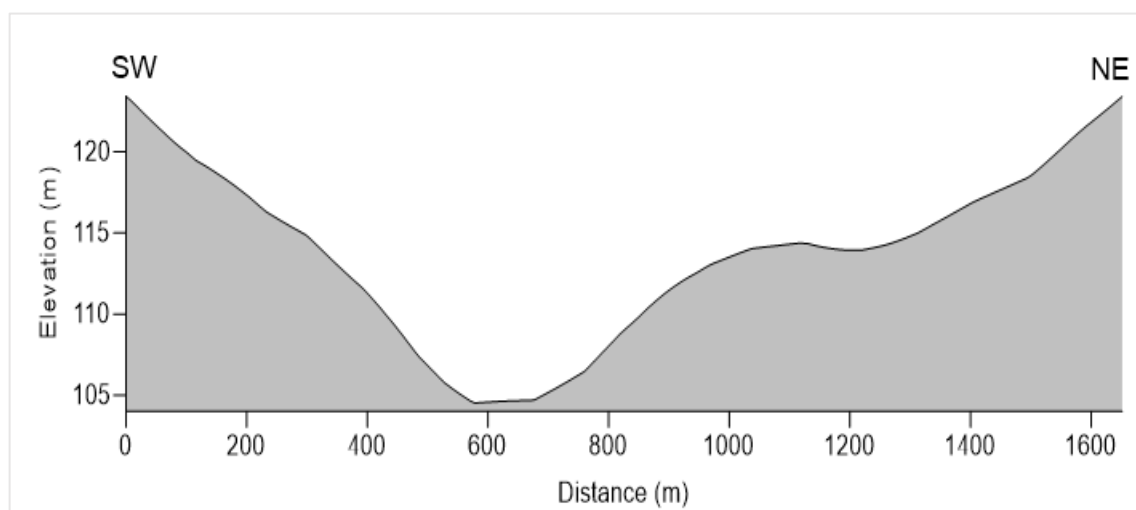


Figure 62. Profil en travers du bas-fond de l'axe Sintiou-Bayq.

Le bas-fond du village de Fangama s'étire sur 9,6 km de long et couvre 22,3 km². Il se localise le long de l'affluent de rive gauche du Fangama, le Parawol. Très ramifiés (ordre 4 à l'exutoire), ce bas-fond se situe entre 90 et 130 m d'altitude. Ses versants sont rectilignes dans le secteur Ouest, et convexo-concaves dans le secteur Est, avec des pentes qui varie de 12,5 % (versant Ouest) à 3,9 % (versant NE) (Fig.63). Il a une forme concave, caractéristique d'une dépression à forte capacité de rétention en eau. Le régime hydrologique de ce bas-fond dépend des apports hydriques des versants et du Parawol avec lequel il est constamment connecté pendant la saison des pluies.

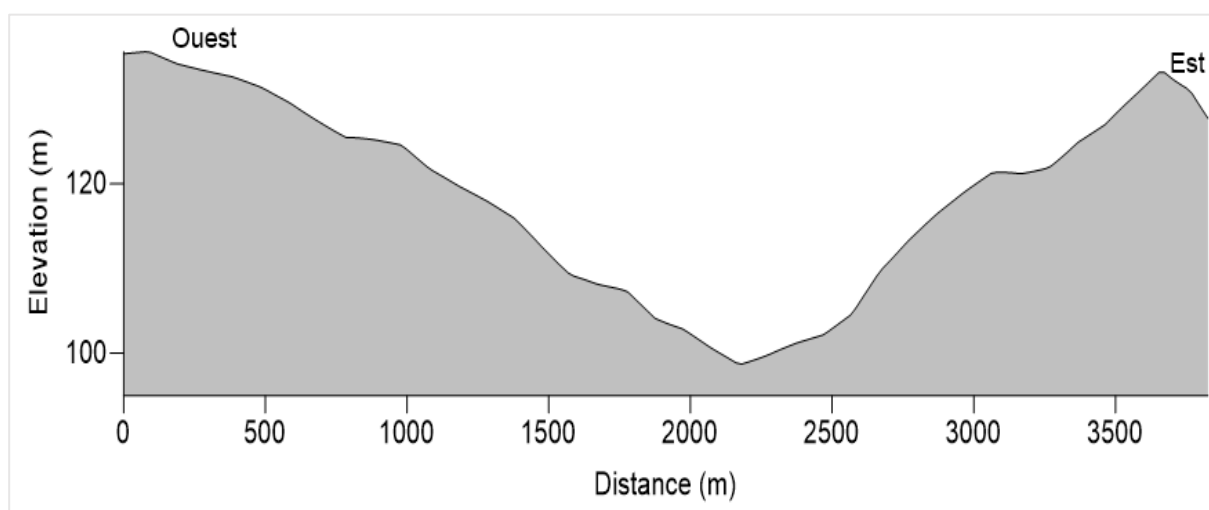


Figure 63. Profil en travers du bas-fond du village de Fangama.

III.1.2.2. Le bassin versant du Diouguel

Le bassin du Diouguel, situé entre 12°23'30' et 12°32' nord et entre 12°33'30' et 12°41' ouest, draine une superficie de 73.9 km² et un périmètre de 64.68 km. Il est orienté ESE/WNW et parcourt 24.2 km d'amont en aval. Il prend sa source à 175 m d'altitude dans la localité de Neppen Diaka. Les tableaux 22 et 23 montrent respectivement la synthèse des caractéristiques morphométrique et topographique du bassin du Diouguel.

Tableau 22. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin du Diouguel

Superficie	Périmètre	K _C	L	<i>l</i>	D	I _g	D _s	I _p Roche	L. talweg	Pente talweg	T _c
km ²	km		Km	km	m	m/km	m		km	m/km	Heure
73,93	64,68	2,1	29,9	2,5	59,0	1,98	16,99	1,57	24,2	2,4	5,3

Tableau 23. Morphométrie de la topographie du bassin du Diouguel

Alt. Maxi	Alt. Mini	Alt. Moy	ΔH	Alt. Médiane	Quartile 75%	I _p moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
175	75	123,5	100	123,5	147,75	11,6

L'ensemble du bassin est couvert par des courbes de niveau équidistantes de 10 m ; trois unités géomorphologiques se dégagent : glacis cuirassés, inselbergs et bas-fonds (Fig.64).

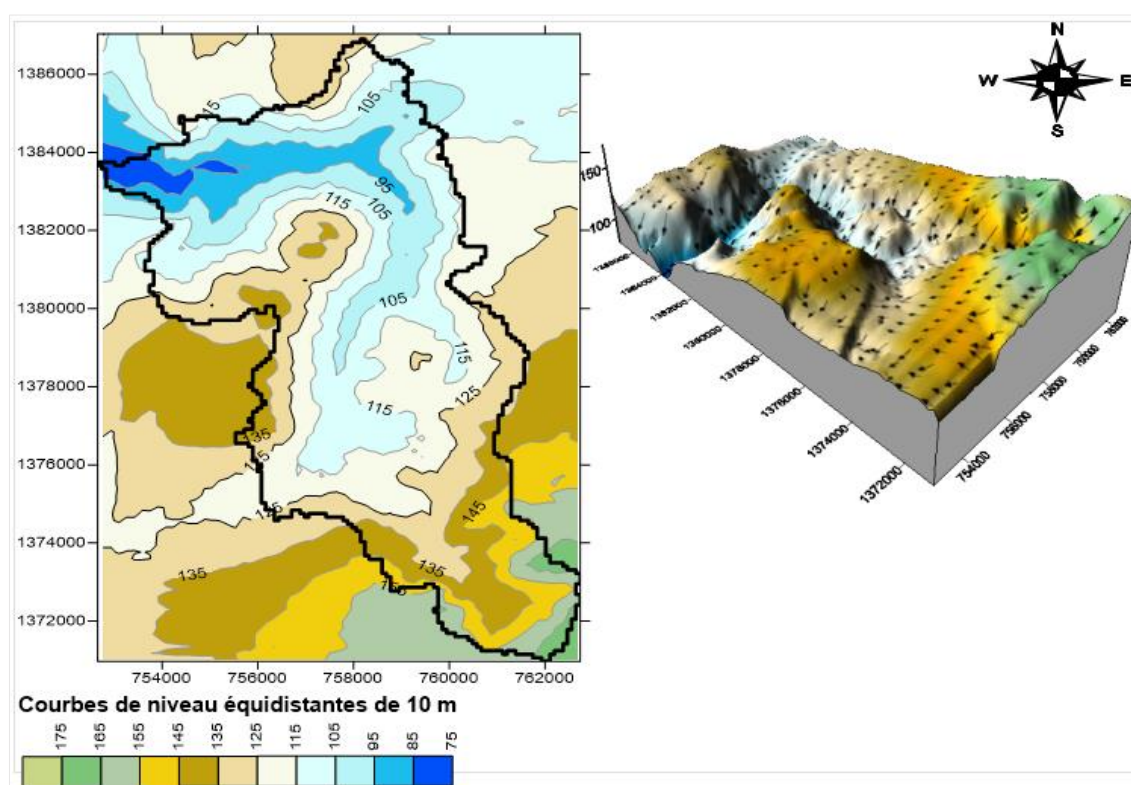


Figure 64. Courbes de niveau équidistantes de 10 m et MNT 3D du bassin du Diouguel

L'analyse de sa courbe hypsométrique montre que :

- ✓ 65% de la superficie du bassin ont des altitudes inférieures à 130 m ;
- ✓ 31% ont entre 130 et 150 m d'altitude ;
- ✓ et seulement 4% de la superficie du bassin ont des altitudes supérieures à 150 m.

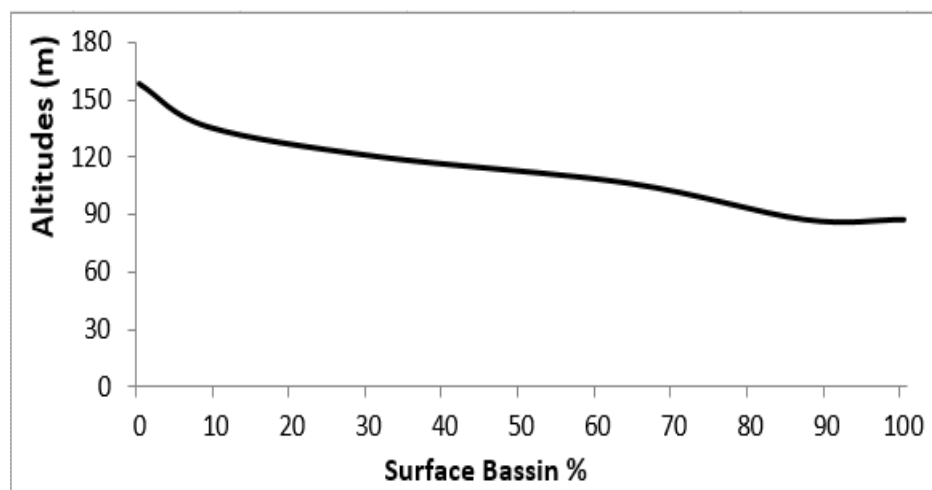


Figure 65. Courbe hypsométrique du bassin versant du Diouguel.

Sa forme très allongée et l'importance de ses pentes transversales et longitudinales (Fig.66) lui confèrent un temps de réponse très lente (2h39mn) aux impulsions pluviométriques.

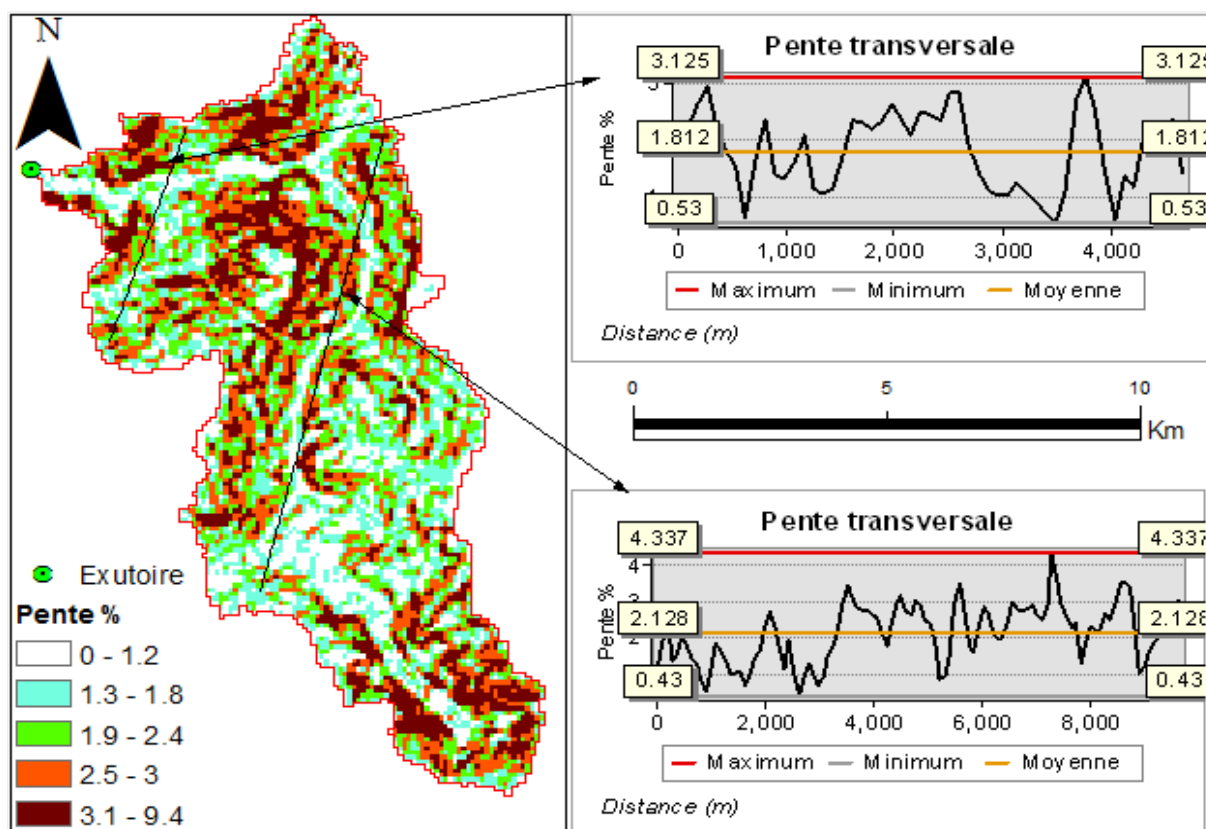


Figure 66. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Diouguel.

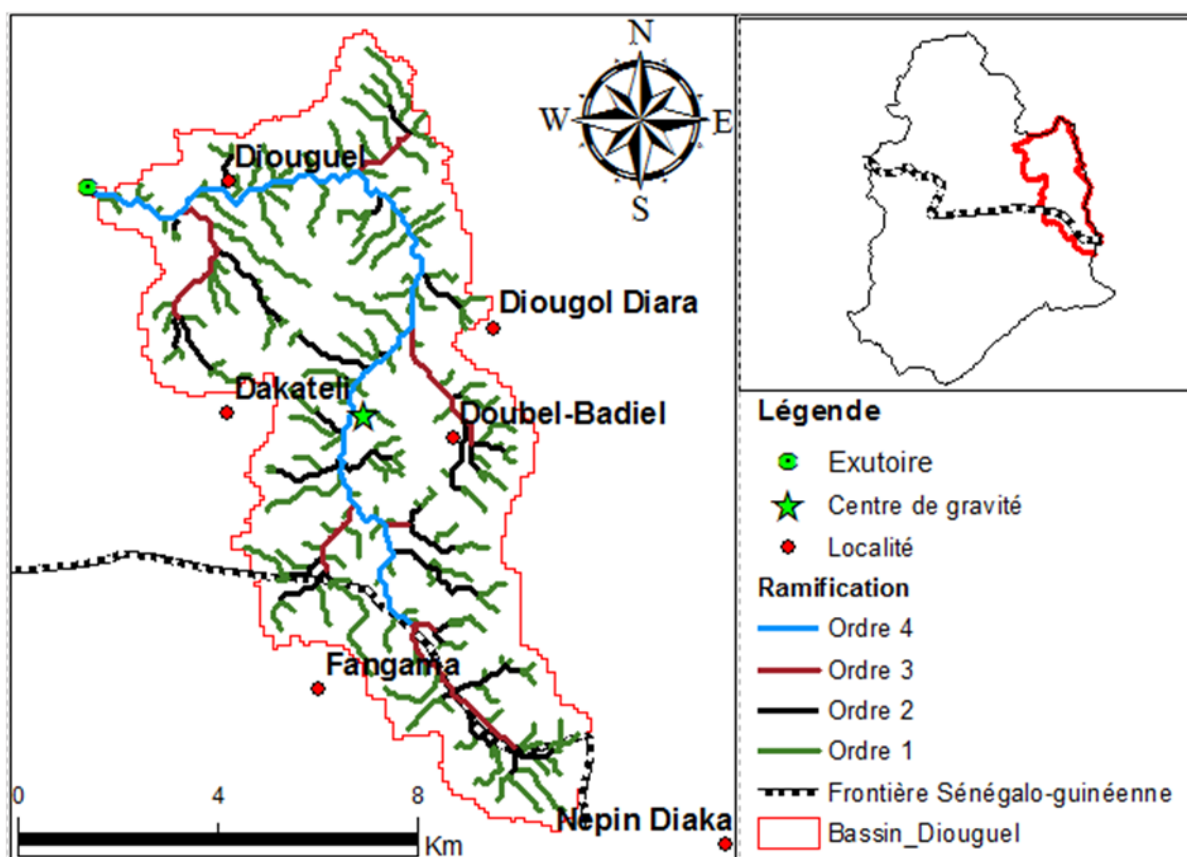


Figure 67. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Diouguel

III.1.2.2.1. Morphopédologie du bassin versant du Diouguel

Le bassin du Diouguel est couvert par cinq (5) types de sols. Il s'agit des :

- ✓ associations de sols ferralitiques et de sols hydromorphes qui couvrent 12% de la superficie du bassin. Ces types de sols se localisent au sud-ouest du bassin, dans le village de Fangama ;
- ✓ associations de sols hydromorphes et sols peu évolué organiques (22% du bassin), qui se localisent sur la plaine d'inondation ;
- ✓ lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravillonnaire qui couvrent 23% de la superficie du bassin. Ils sont réduits aux ruptures de pente où la cuirasse affleure en corniche. Ces types de sols ont les mêmes caractéristiques que les lithosols sur quartzites qui affleurent sur les inselbergs de grès feldspathiques organisés autour du village de Dakateli, au nord-ouest du bassin du Diouguel.
- ✓ Régosols sur matériau argileux d'altération et sur matériau gravillonnaire qui occupent 9% de la superficie du bassin. Ces types de sols sont très caractéristiques des sols des formations paléozoïques, qui reçoivent des gravillons ferrugineux provenant du

démantèlement des cuirasses sus/sous-jacentes. Ils sont localisés sur la partie haute des bas-fonds ;

- ✓ Et des sols peu évolués sur matériau gravillonnaire. Il s'agit des types de sols les plus répandus dans le bassin du Diouguel (34 % de sa superficie). Ils sont très fréquents dans les villages de Diouguel, Diougol-Diara et Doubel-Badiel (Fig.68).

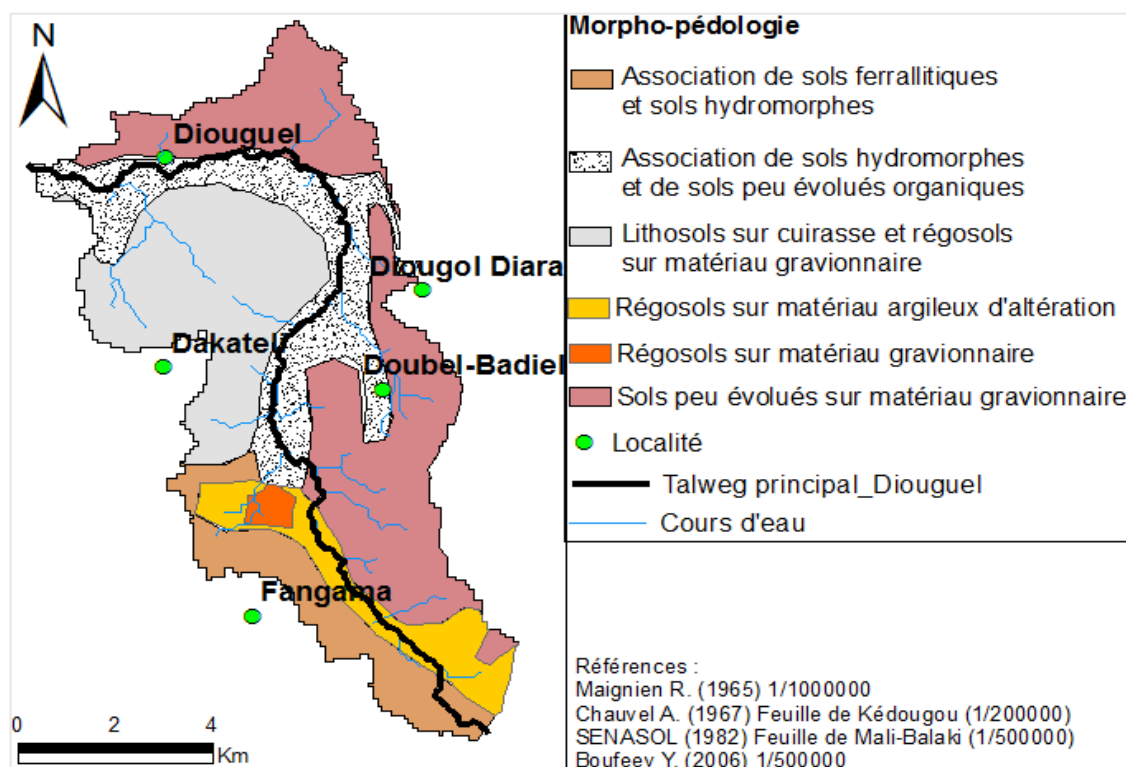


Figure 68. Morpho-pédologie du bassin du Diouguel.

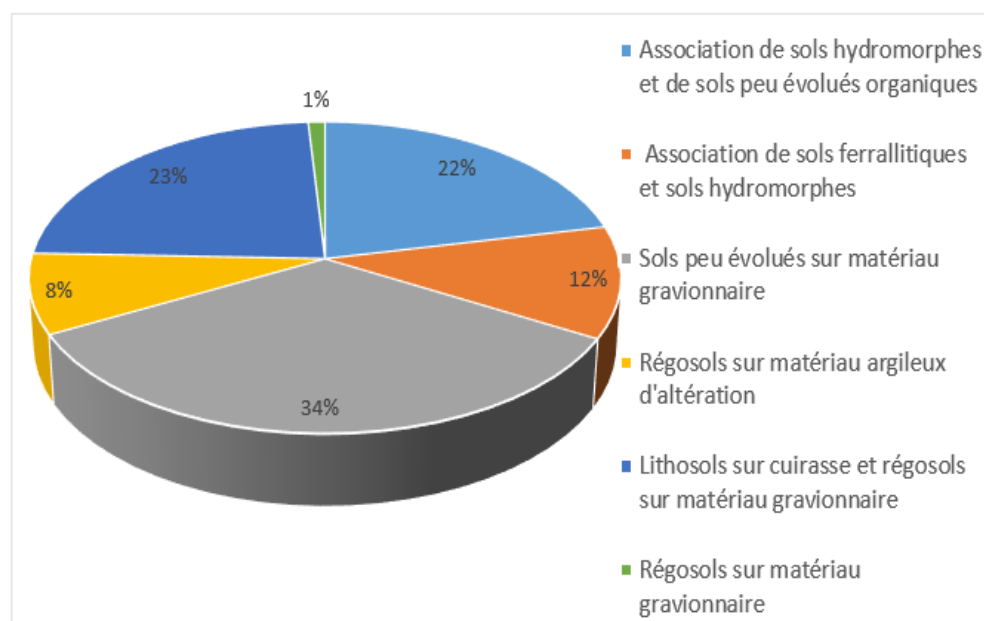


Figure 69. Bassin du Diouguel – Pourcentages des différents ensembles de sols.

III.1.2.2.2. Occupation des sols du bassin versant du Diouguel

Les unités paysagères du bassin du Diouguel (Fig.70) sont marquées par l'importance des bas-fonds qui couvrent une superficie de 31.3 km², soit 42% du bassin (Fig.71). Cependant, cet énorme potentiel en bas-fond est très faiblement exploité : à peine 4.2%, équivalant à une superficie de 1.3 km² sont mis en culture. Cette unité est suivie par les formations végétales et les cuirasses latéritiques (Fig.71).

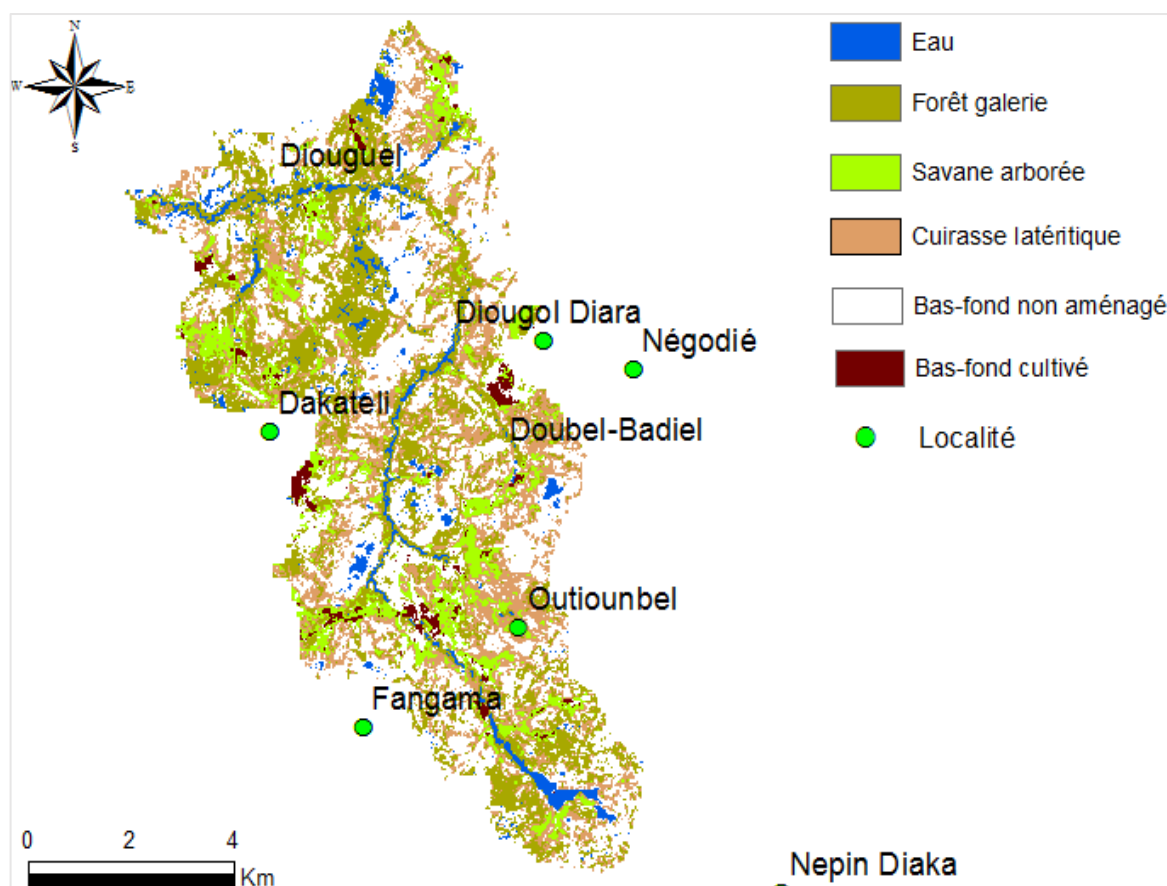


Figure 70. Bassin du Diouguel – Carte d'occupation des sols.

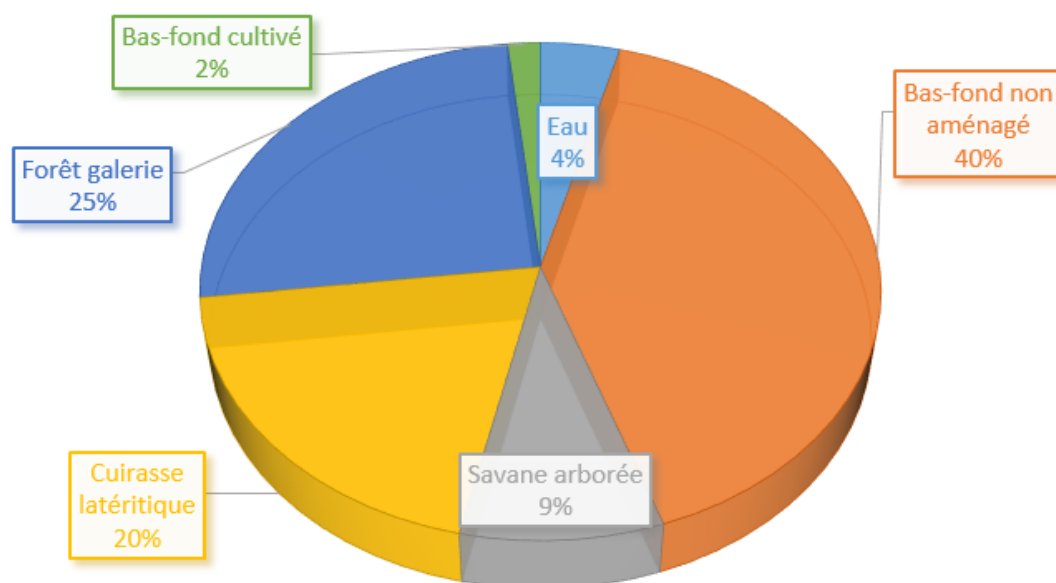


Figure 71. Bassin du Diouguel – Pourcentages des unités d'occupation des sols.

III.1.2.2.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Diouguel

Le bassin du Diouguel contient 31.3 km² de zones inondables, localisées le long de sa rivière et de ses affluents. On distingue quatre sites correspondant aux bas-fonds du Diouguel.

La Tête de bas-fond, qui se localise dans le village de Neppen Diakha, couvre 2.78 km² et s'étire sur 2.1 km de long. Elle se situe à 131 m d'altitude aux pieds du massif de Neppen Diakha ; les pentes y sont assez fortes (1.4%) (Fig.72). Elle est peuplée par une savane arborée.

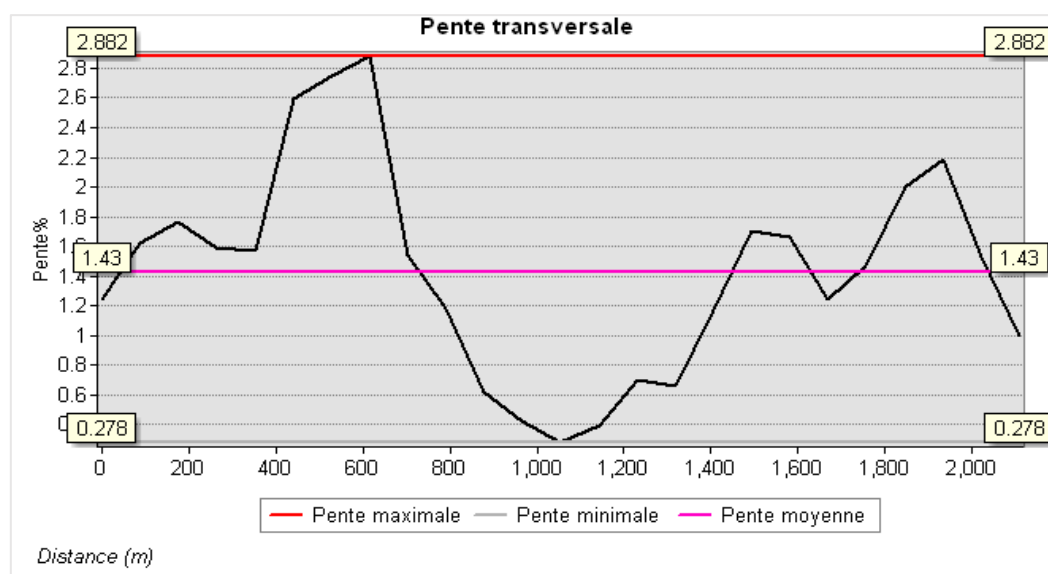


Figure 72. Pentes transversales du bas-fond de Neppen Diakha

Elle se caractérise par une forme en amphithéâtre, sans cours d'eau individualisé (Fig.73).

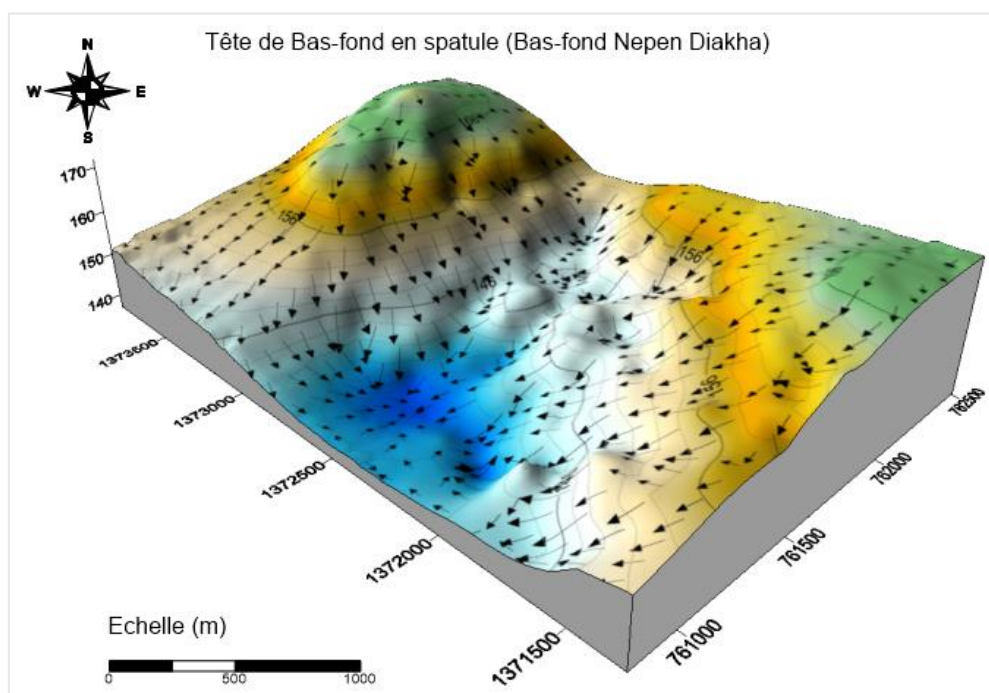


Figure 73. Tête de bas-fond localisée dans le village de Neppen Diakha

Le bas-fond d'Outiounbel, au nord-est, couvre 2.2 km² et s'étire sur 0.85 km de large et 2.6 km de long. Il s'agit également de tête de bas-fond de l'affluent du Diouguel, le Doubel-Badiel. Il se situe à 131 m d'altitude et les pentes y sont assez fortes (1.6%).

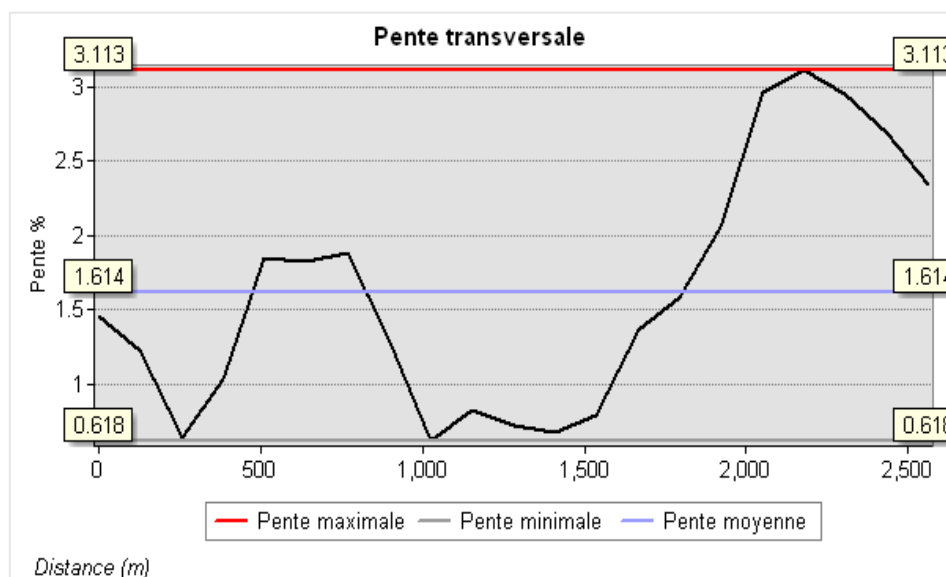


Figure 74. Pentes transversales du bas-fond d'Outiounbel

La figure 75 montre la configuration en Trois Dimensions (3D) du bas-fond d'Outiounbel, caractérisé par une forme en spatule, sans cours d'eau individualisé.

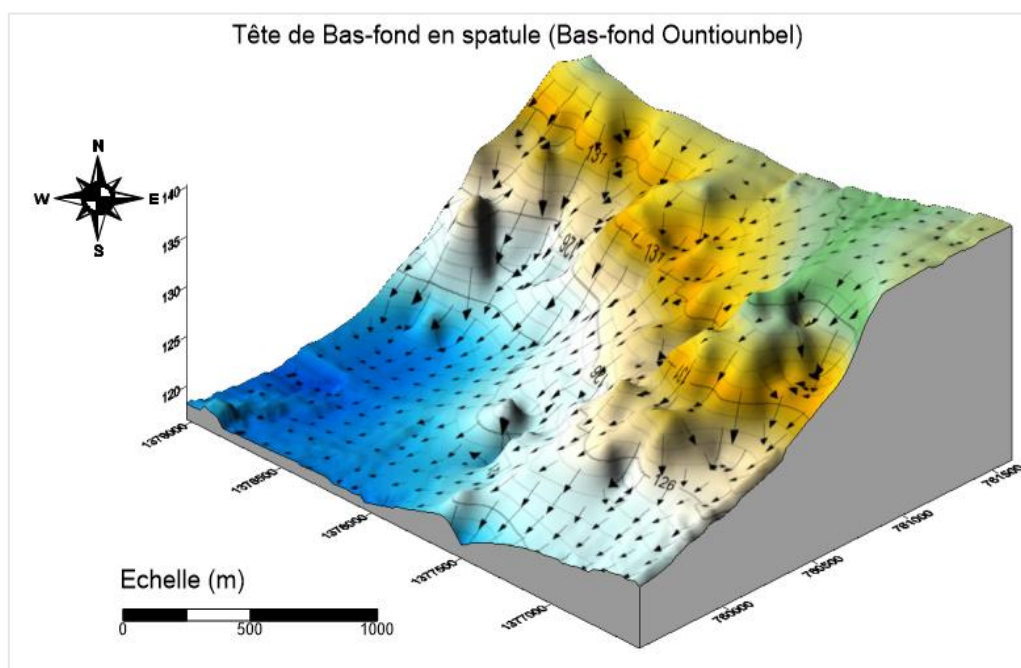


Figure 75. Profil 3D du bas-fond d'Outiounbel

La zone centrale du bas-fond se localise près du village de Négodié. Elle mesure 9.3 km de long et 1.5 km de large. Elle se caractérise par une forme concave, à fond plat, et une pente transversale de 1.4%. Cette zone est régulièrement inondée, à partir du milieu de la saison des pluies. Les parties hautes des versants sont dominées par des lithosols sur cuirasse et les fonds des bas-fonds par des sols argileux ou argilo-limoneux provenant du démantèlement des cuirasses sus/sous-jacentes. Les versants sont occupés par la forêt galerie et la savane boisée ou arbustive peuple les zones de bas-fonds.

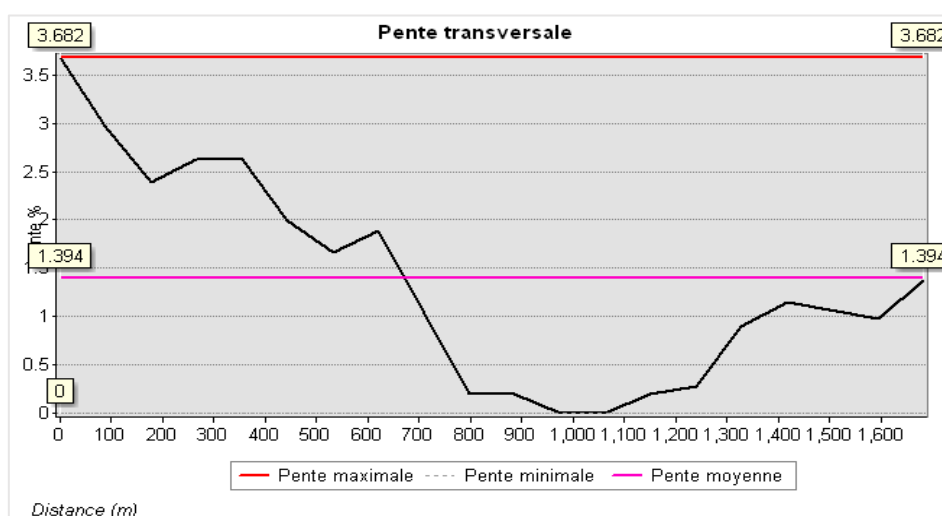


Figure 76. Pentas transversales du bas-fond de Négodié

La partie avale des bas-fonds couvre 11.9 km² et s'étire sur 1.3 km de large. Elle est localisée dans le village de Diouguel. Elle est connectée aux bas-fonds de Neppen Diakha, d'Outiounbel et de Négodié qui l'alimentent lorsqu'ils sont pleins. Elle peut également recevoir des apports des versants par ruissellement hortonien et des altérites pendant une bonne partie de l'année. En conséquence, la dynamique hydrologique des bas-fonds est fonction surtout des périodes de submersion et leur durée, la forme et la dynamique des crues et de l'amplitude des variations saisonnières des altérites.

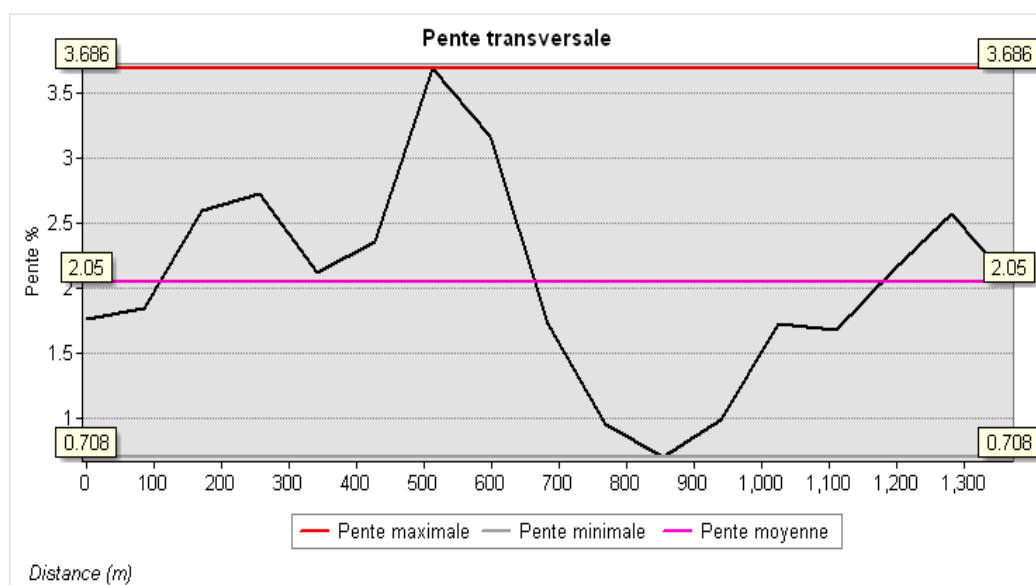


Figure 77. Pentes transversales du bas-fond de la partie avale (Diouguel)

III.1.2.3. Le bassin versant du Dakately

Situé entre les latitudes 12°24' et 12°30'30' et les longitudes 12°38'30' et 12°43', le bassin du Dakately couvre une superficie de 44 km² et un périmètre de 47 km. Il est orienté SE/NW et parcourt environ 12.47 km d'amont en aval. Sa forme très allongée ($K_c = 1.97$) et ses pentes abruptes lui confert un temps de concentration très court des eaux de ruissellement (Tab.24-25).

Tableau 24. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Dakately

Superficie	Périmètre	K_c	L	l	D	I_g	D_s	I_p Roche	L. talweg	Pente talweg	T_c
km ²	km		km	km	m	m/km	m		km	m/km	Heure
44	47	1,97	21,2	2,1	69	3,25	21,56	2,02	12,47	5,53	2,2

Tableau 25. Morphométrie de la topographie du bassin versant du Dakately

Alt. Max	Alt. Min	Alt. Moy	ΔH	Alt. Médiane	Quartile 75%	I_p moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
166	75	121	89	121	143	13,71

Son réseau hydrographique de forme dendritique (Fig.78), témoigne de l'importance du système de drainage lequel est renforcé par la faible perméabilité des terrains.

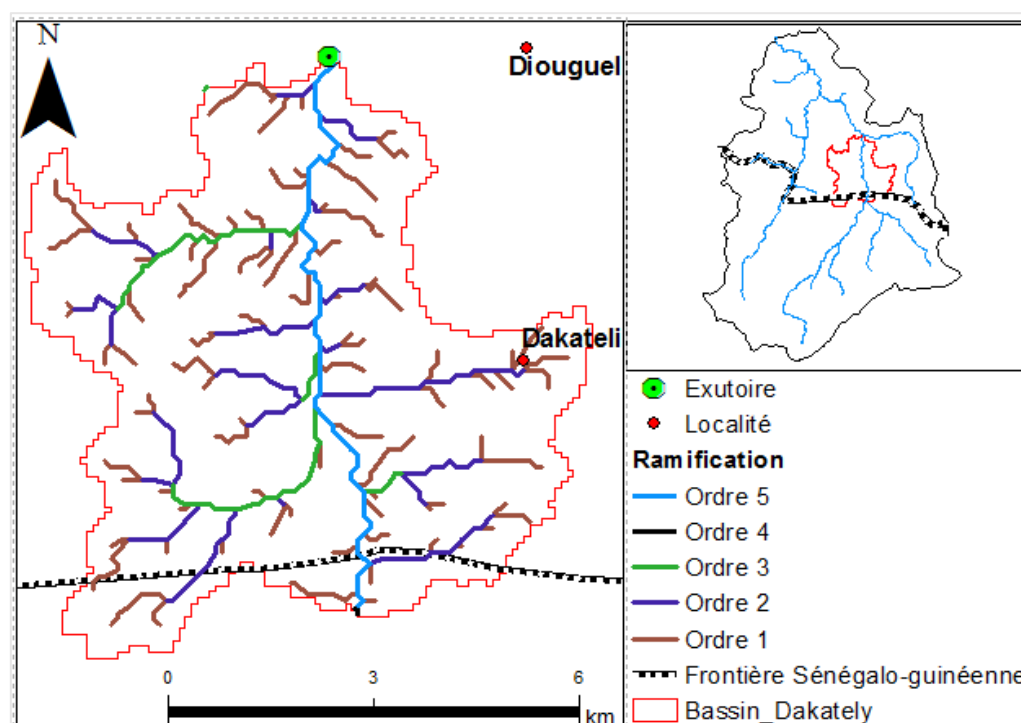


Figure 78. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Dakately

Le Dakately prend sa source à environ 166 m d'altitude, près de Neppen Peulh. Entaillé dans les formations précambriennes du socle, sa structure géomorphologique est dominée par des

reliefs résiduels qui peuvent aller jusqu'à plus de 160 m d'altitude, et des dépressions d'altitudes variant entre 75 et 110 m (Fig.79). Ses pentes transversales varient entre 2 et 3.2% (Fig.80).

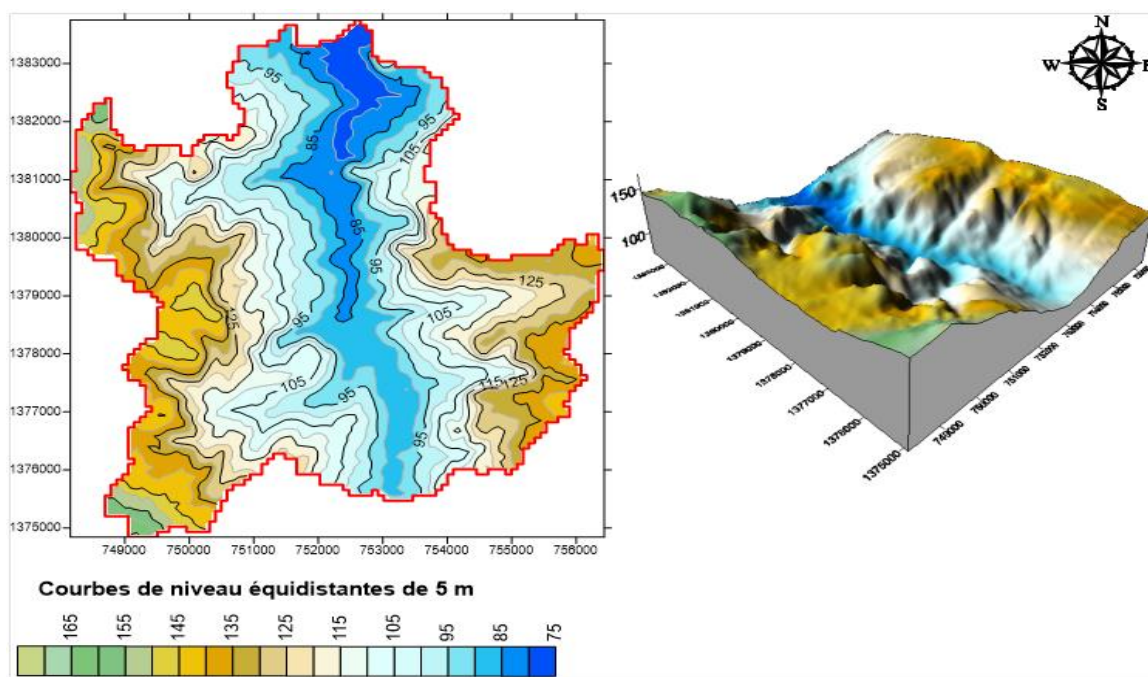


Figure 79. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Dakately

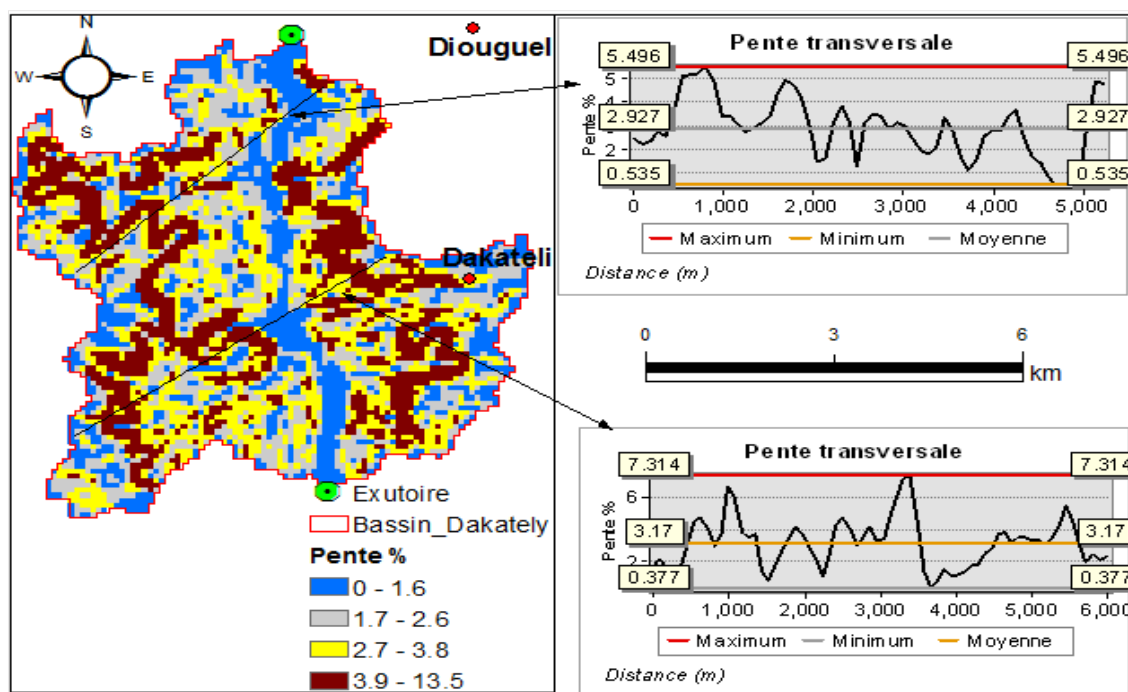


Figure 80. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Dakately

L'analyse de la courbe hypsométrique du bassin du Dakately révèle que :

- ✓ 38% de la superficie du bassin ont des altitudes supérieures à 100 m ;

- ✓ et 62% ont des altitudes inférieures à 100 m.

l'essentiel de la topographie du bassin est constitué par la classe d'altitude 75-100 m.

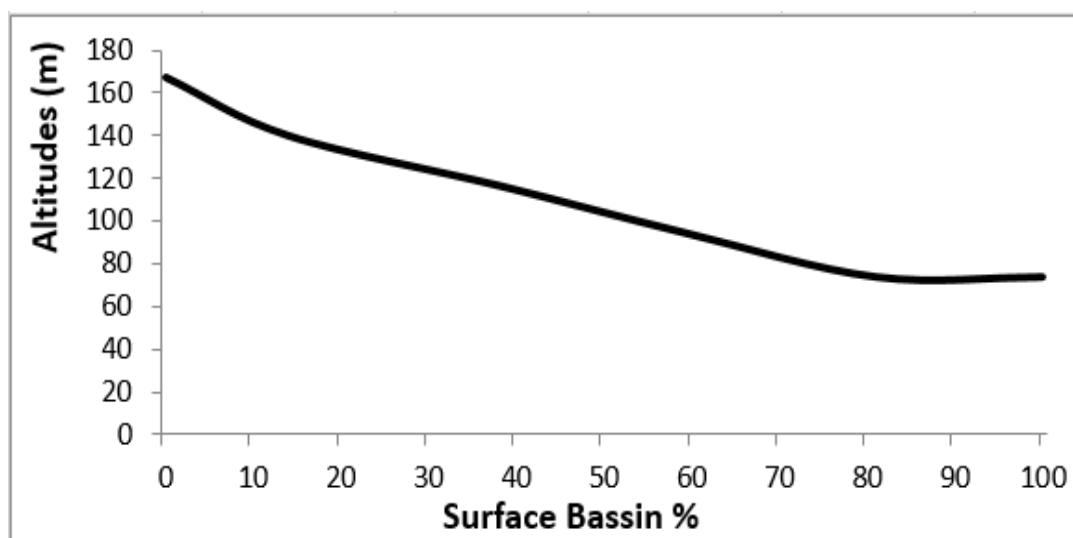


Figure 81. Courbe hypsométrique du bassin du Dakately

III.1.2.3.1. Morphopédologie du bassin versant du Dakately

Le bassin du Dakately est couvert essentiellement par cinq (5) types de sols. Il s'agit des :

- ✓ lithosols sur cuirasse qui couvrent une superficie de 5 km² soit 13% du bassin. Ces types de sols se localisent sur les collines de Kéwé, au nord-ouest du bassin du Dakately.
- ✓ Associations de sols ferrallitiques et sols hydromorphes qui couvrent 15% de la superficie du bassin du Dakately. Il s'agit des sols des parties hautes des bas-fonds du Dakately qui se situent près de la frontière Sénégal-guinéenne.
- ✓ Associations de sols hydromorphes et de sols peu évolués organiques sur le lit du cours d'eau couvrent 27% du bassin.
- ✓ Associations lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravillonnaire qui couvrent 18% de la superficie du bassin. Ces types de sols s'établissent sur les collines cuirassées de Dakately et de Diouguel.
- ✓ Et des régosols sur matériau argileux d'altération ou sur matériau gravillonnaire qui constituent les groupes de sols les plus répandus dans le bassin (Fig.82-83). Il s'agit des sols de bas-fonds issus du démantèlement de la cuirasse sus-jacente.

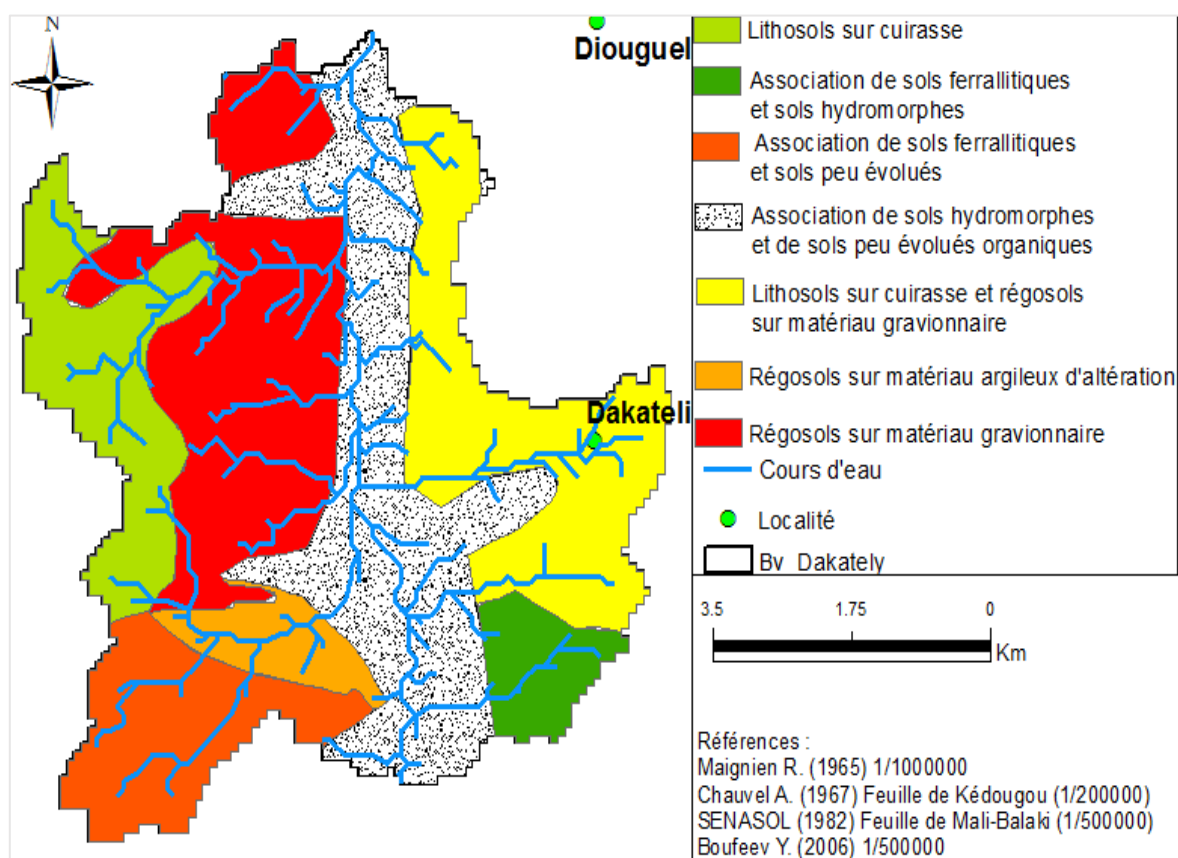


Figure 82. Bassin du Dakately – Carte morpho-pédologique.

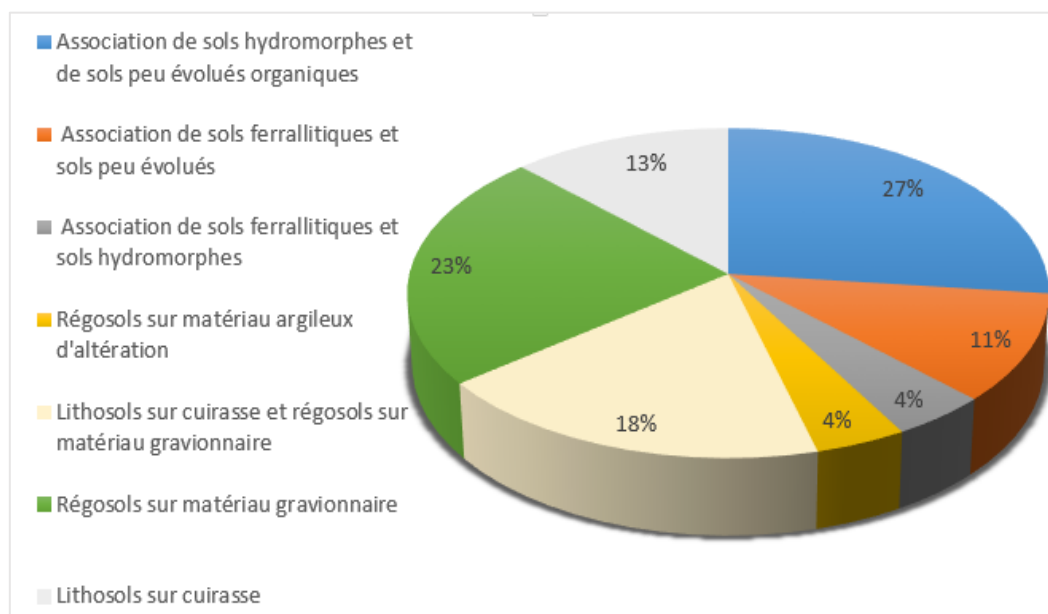


Figure 83. Bassin du Dakately – Pourcentage des unités pédologiques

III.1.2.3.2. Occupation des sols du bassin versant du Dakately

Le bassin du Dakately est marqué par l'importance de la forêt galerie qui couvre à elle seule 43% de sa superficie (Fig.84-85). Cette unité paysagère est suivie par les bas-fonds (19%), l'eau (13%), la savane arborée (11%) et la cuirasse latéritique (9%).

Les zones de culture couvrent 2.2 km², soit 5% du bassin et 28% de la superficie totale des bas-fonds (Fig.85).

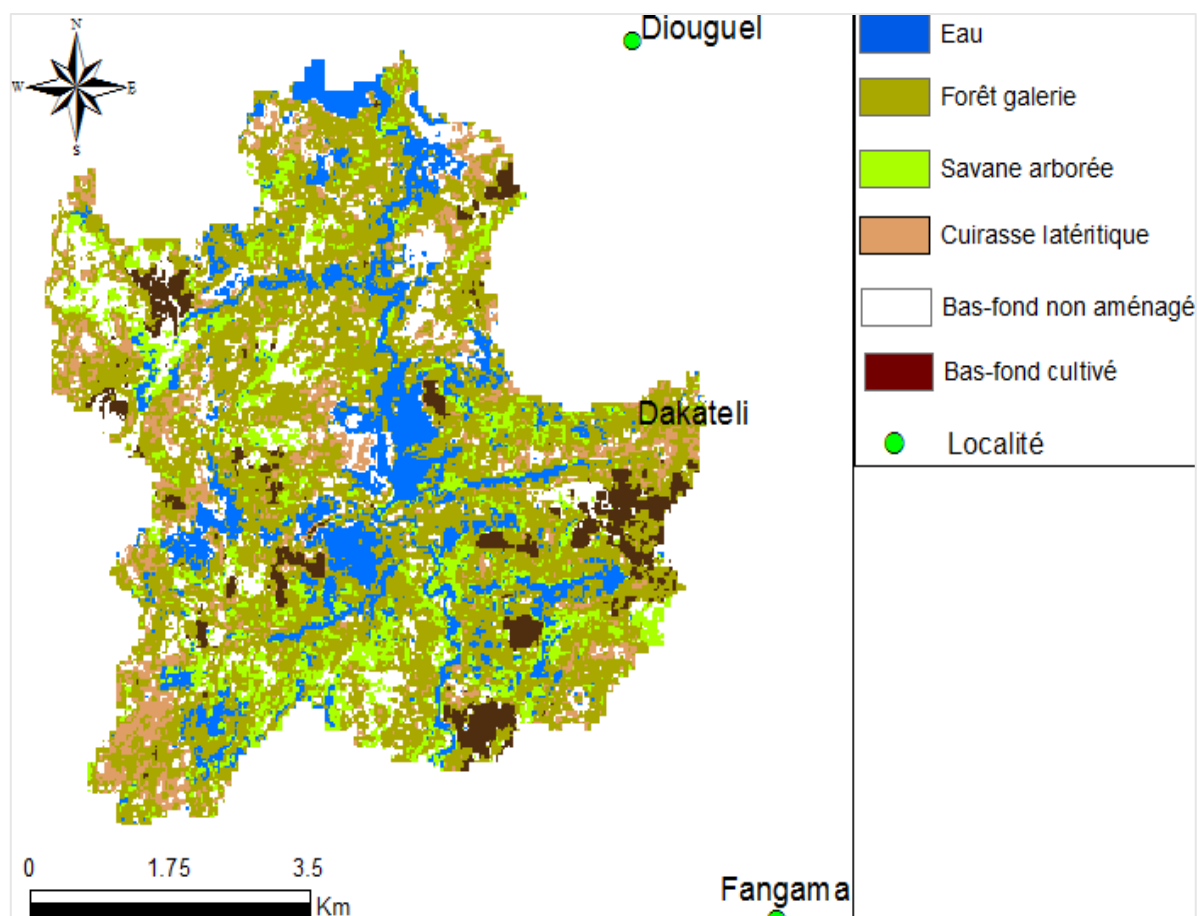


Figure 84. Bassin du Dakately – Carte d'occupation des sols.

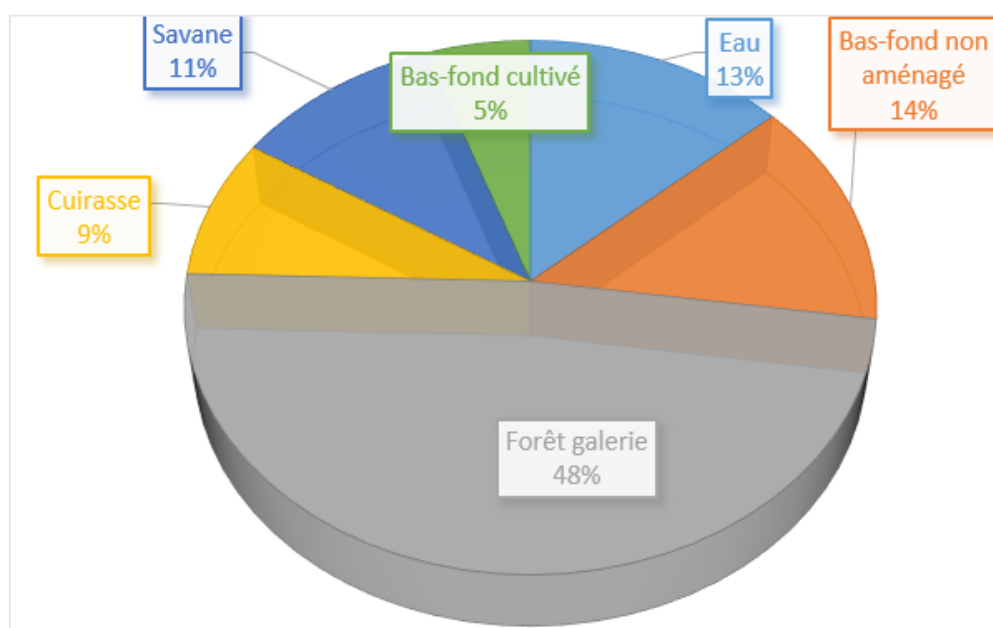


Figure 85. Bassin du Dakately – Pourcentages des unités d'occupation des sols.

III.1.2.3.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Dakately

Le bassin du Dakately couvre 8.4 km² de bas-fonds soit 19% du bassin. Ces bas-fonds sont répartis entre deux sites qui se distinguent par la topographie.

Le bas-fond du secteur sud-est couvre 2.84 km² et s'étire sur 0.8 km de large. Il s'agit de la partie la plus en amont du réseau de drainage (tête de bas-fond), constituée essentiellement de cours d'eau d'ordre 1. Il a une forme concave qui collecte les eaux provenant des hautes terres constituées essentiellement de lithosols sur cuirasse. Ce bas-fond se situe entre 145 et 87 m et se caractérise par des pentes fortes (2.6%). Il déverse dans la vallée principale, située près du village de Lally. C'est dans cette partie des bas-fonds que les éleveurs de Dakately abreuvent leur bétail. Elle constitue également une zone privilégiée pour les cultures qui ne supportent pas l'inondation passagère telles que l'arachide et le maïs.

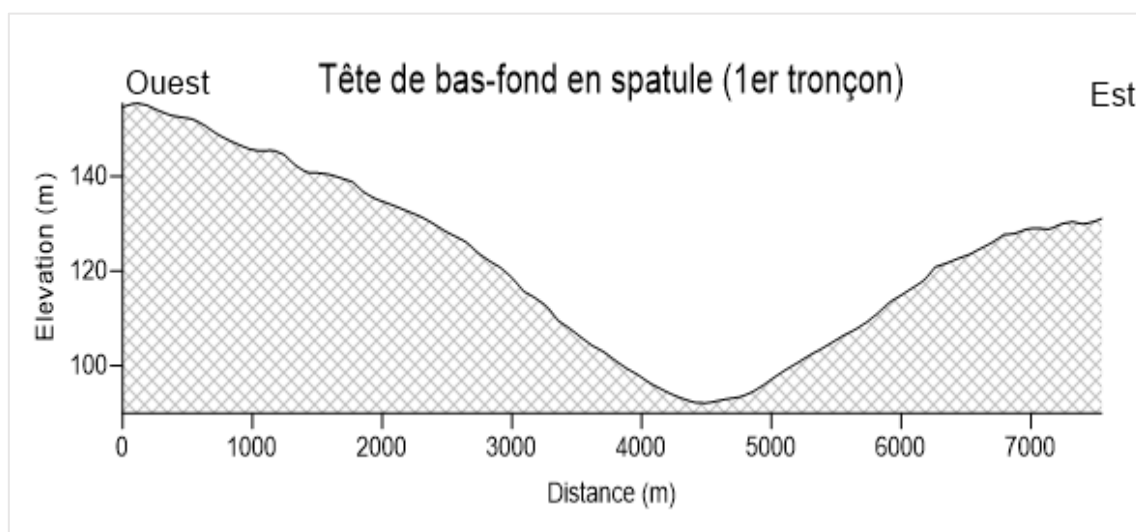


Figure 86. Profil en travers de la tête de bas-fond (sud-est de Dakately)

La zone centrale du bas-fond de Dakately couvre 5.6 km² et s'étire sur 1.80 km de large. Elle connaît une plus grande extension dans le village Lally, au nord-est de Dakately. Les types de sols y sont dominés par des sols alluviaux à texture fine argilo-limoneuse et argilo-sableuse. Ce qui fait de cette partie du bas-fond, la zone par excellence des exploitations maraîchères et des cultures rizicoles. Il s'agit d'une vallée très ramifiée (ordre 4 à l'exutoire), située entre 145 et 80 m d'altitude, et où les pentes fortes (2.4%) (Fig.87) témoignent de la puissance érosive des eaux de ruissellement qui favorise souvent l'ensablement et l'engorgement rapide des rizières pendant la saison des pluies.

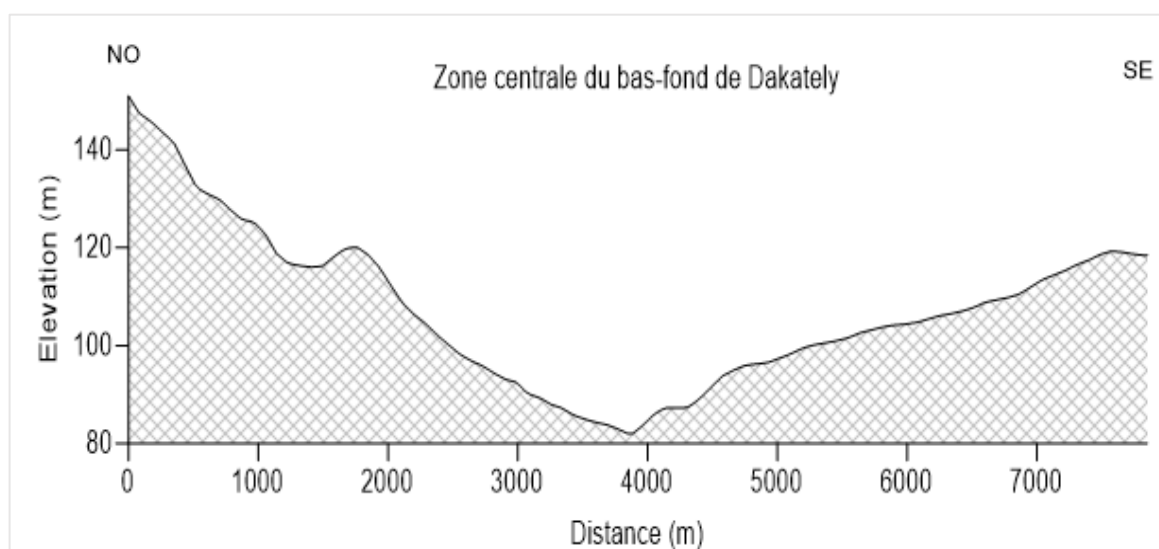


Figure 87. Profil en travers du bas-fond de Lally

III.1.2.4. Le bassin versant du Gokodou

Le bassin du Gokodou, situé entre 12°32' et 12°36' nord et entre 12°42' et 12°45' ouest, draine une superficie de 14.4 km² et un périmètre de 23.2 km. Il parcourt 8.2 km d'amont en aval. Son affluent le plus important est issu des collines de Mbéma au nord-est qui culminent à environ 180 m (Fig.88).

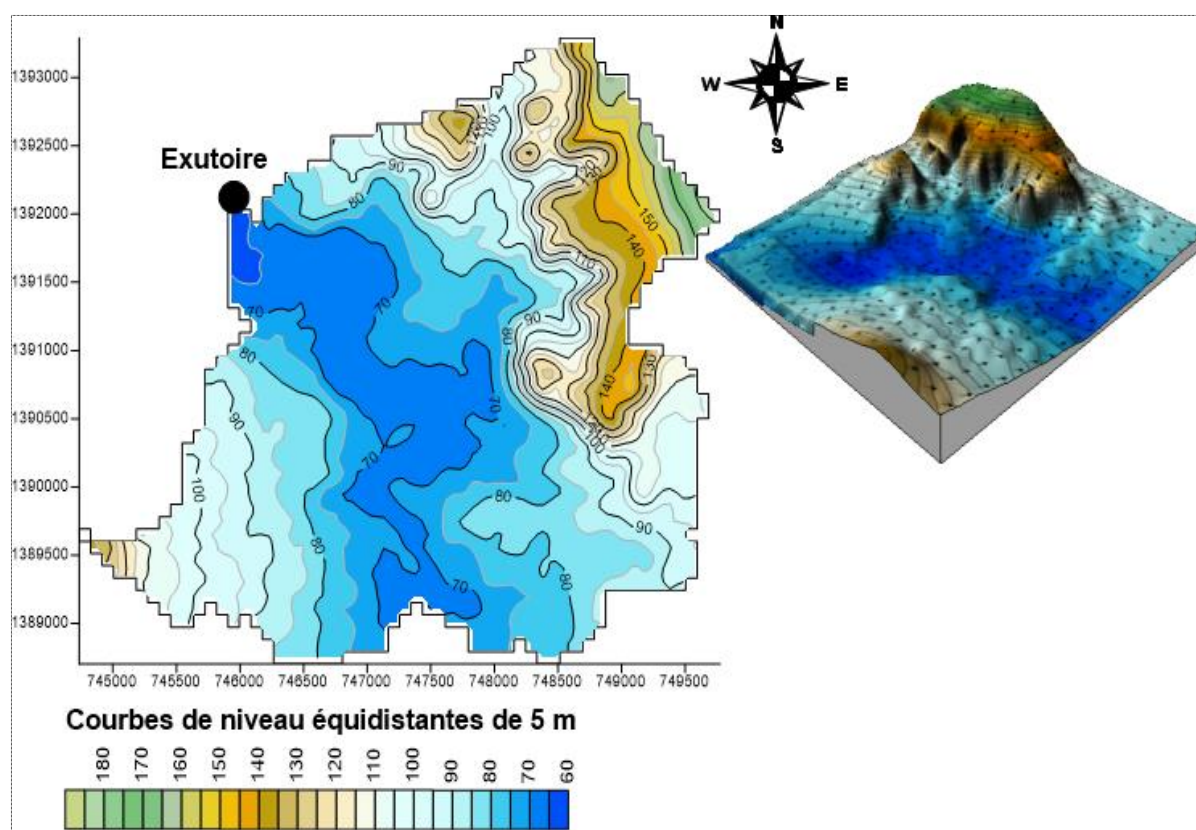


Figure 88. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Gokodou

Avec une forme assez allongée et de fortes pentes transversales, les eaux de ruissellement du Gokodou mettent environ 1 heure pour arriver à son exutoire (Tab.26 et Fig.89). Ce faible temps de parcours des flux aura des conséquences sur les débits de pointe observés à l'exutoire ainsi que sur la capacité érosive et de transport des matières solides.

Tableau 26. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin du Gokodou

Superficie	Périmètre	K _C	L	<i>l</i>	D	I _g	D _s	I _p Roche	L. talweg	Pente talweg	T _c
km ²	km		km	km	m	m/km	m		km	m/km	Heure
14,4	23,2	1,71	10,2	1,4	96	9,4	35,8	3,4	8,2	11,7	1

Tableau 27. Morphométrie de la topographie du bassin du Gokodou

Alt. Max	Alt. Min	Alt. Moy	ΔH	Alt. Médiane	Quartile 75%	Ip moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
182	63	120	119	119	147	31,3

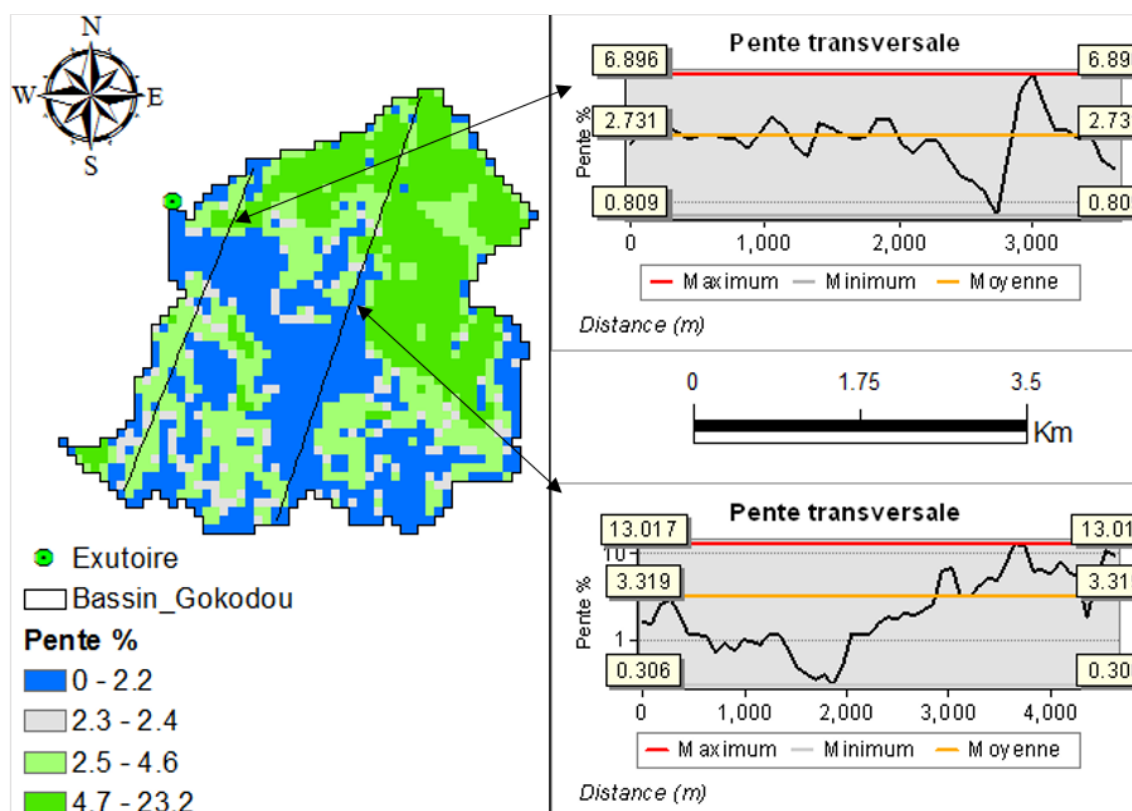


Figure 89. Répartition spatiale des pentes du bassin du Gokodou

L'analyse de la courbe hypsométrique du bassin du Gokodou montre que :

- ✓ les terrains compris entre 63-79 et 79-97 m concernent l'essentiel des surfaces. Ils occupent plus 80% de la superficie du bassin du Gokodou ;
- ✓ 15% de la superficie du bassin ont des altitudes comprises entre 97 et 120 m ;
- ✓ et 4 % ont plus de 120 m d'altitude.

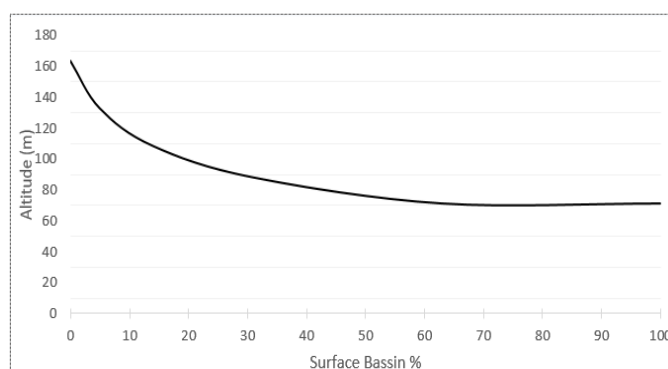


Figure 90. Courbe hypsométrique du bassin du Gokodou

III.1.2.4.1. Morphopédologie du bassin versant du Gokodou

Le bassin du Gokodou est couvert par trois types de sols (Fig.91). Il s'agit des :

- lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravillonnaire qui occupent 12% de la superficie totale du bassin ;
- sols hydromorphes et sols peu évolués organiques, avec 34% de la superficie du bassin ;
- et des régosols sur matériau argileux d'altération. Ces types de sols couvrent la plus grande partie de la superficie du bassin, avec 54 % de sa superficie.

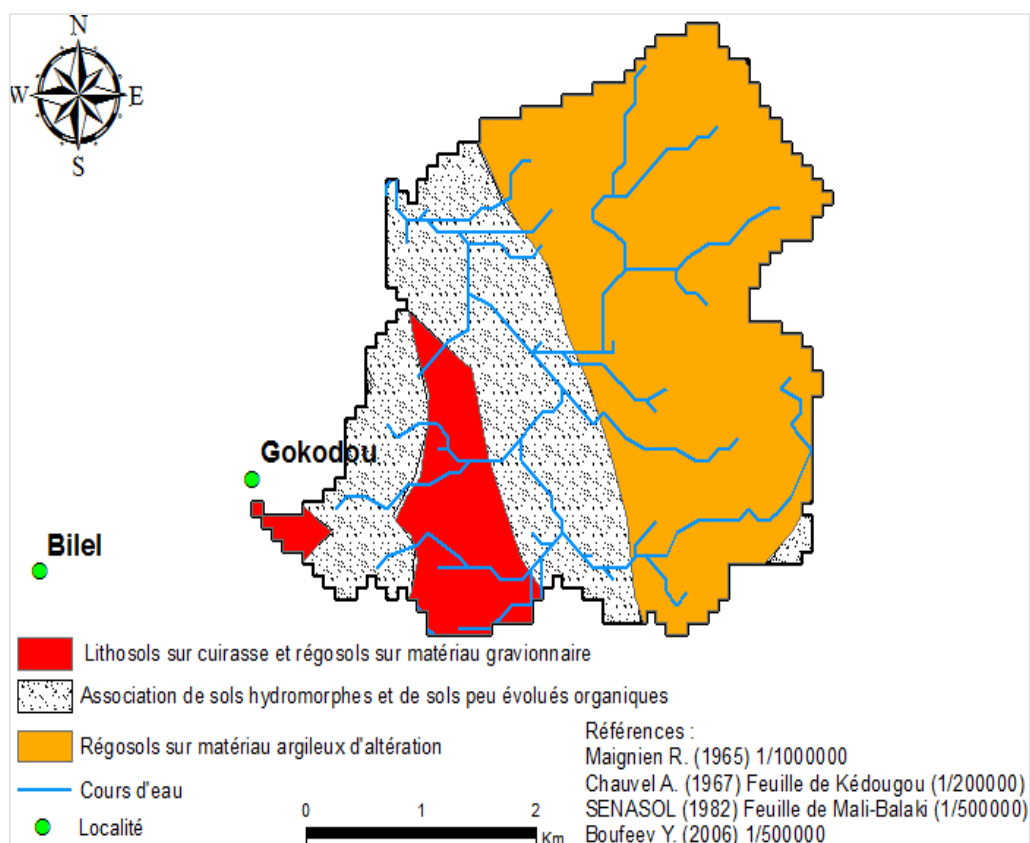


Figure 91. Bassin du Gokodou – Carte des types de sols

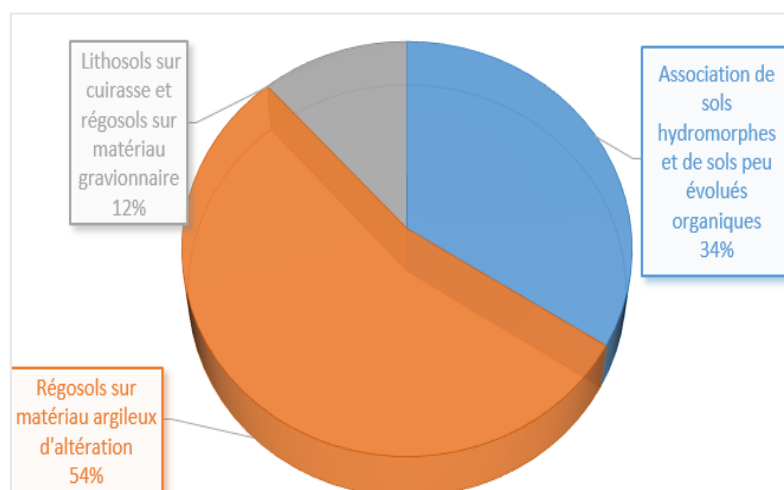


Figure 92. Pourcentage des types de sols du bassin du Gokodou

III.1.2.4.2. Occupation des sols du bassin versant du Gokodou

L'analyse des unités paysagères du bassin du Gokodou montre que la forêt galerie est l'unité la plus répandue (Fig.93). Elle occupe une superficie de 5.7 km² soit 40% du bassin (Fig.94). Cette unité est suivie par les bas-fonds (25%), la cuirasse latéritique (17%), l'eau (16%) et la savane arborée (2%).

Les zones de culture couvrent 14 ha, soit 1% du bassin et 2.5% de la superficie totale des bas-fonds (Fig.94).

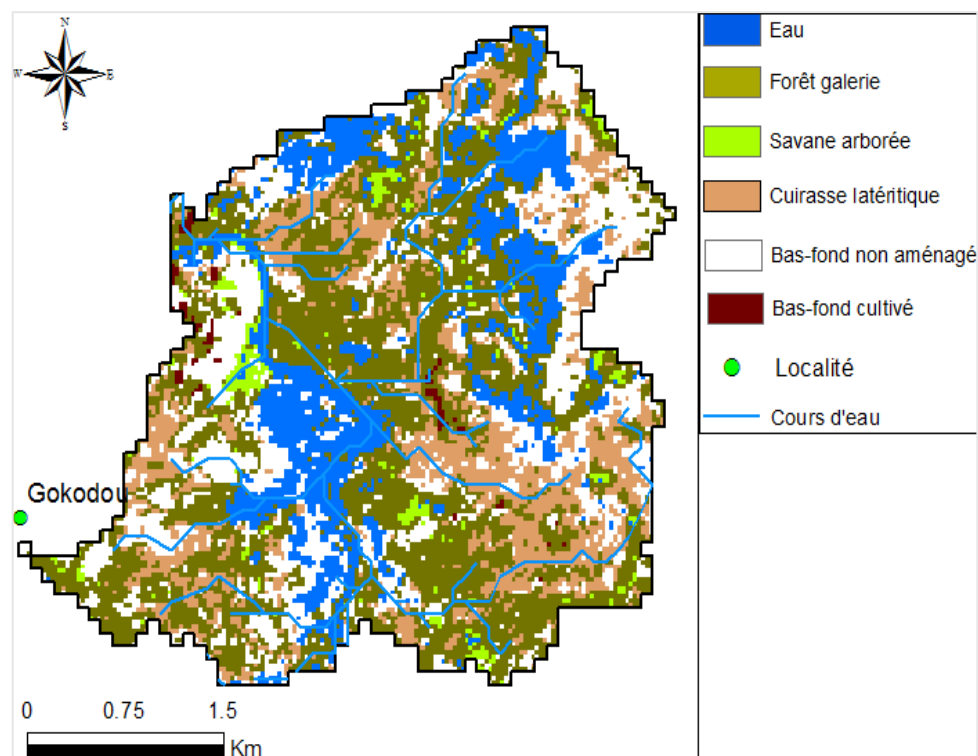


Figure 93. Occupation des sols du bassin du Gokodou

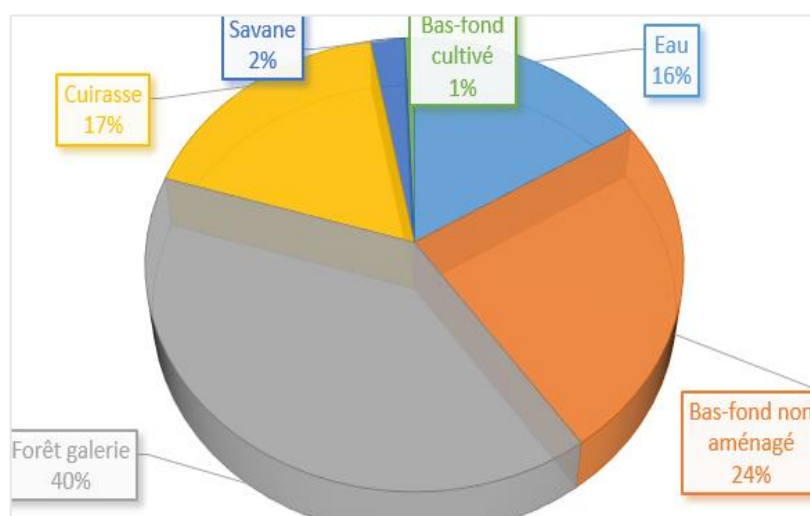


Figure 94. Pourcentages des unités d'occupation des sols du bassin du Gokodou

III.1.2.4.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Gokodou

Il a été recensé 3.64 km² de bas-fonds dans le bassin du Gokodou soit 25% du bassin. Localisés le long du Gokodou et de ses affluents, ces bas-fonds sont répartis entre le secteur nord-est, près du village de Mbéma, et le centre correspondant à la vallée principale du Gokodou. Ils sont exploités essentiellement par les habitants de Gokodou et de Mbéma.

Le bas-fond du secteur nord-est couvre 1.01 km² et s'étire sur 205 m de large. Il se caractérise par une forme ramifiée (ordre 3 à l'exutoire), et des versants convexo-concaves de pentes fortes (4.7%). Il est alimenté par deux axes, l'un provenant à l'est (d'orientation NE-SW) et le second d'orientation NNE-SSW. Des réseaux de collecte des eaux en provenance des collines de Mbéma dissèquent le bas-fond qui conflue avec la vallée principale du bassin du Gokodou.

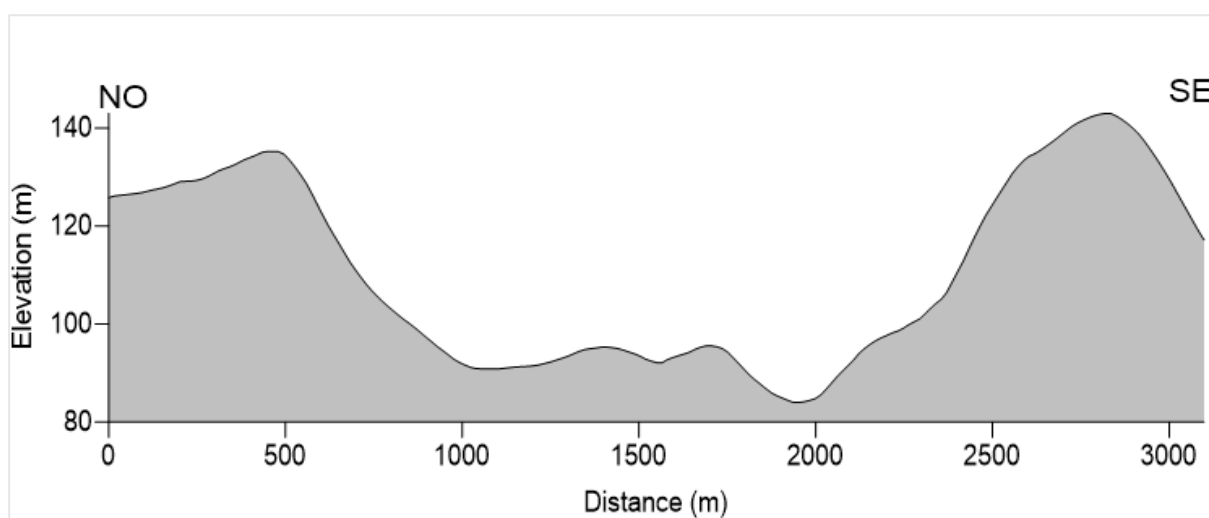


Figure 95. Profil en travers du bas-fond du Gokodou (secteur nord-est)

La vallée principale du Gokodou est longue de 8.2 km et couvre 2.6 km². Elle se situe entre 120 et 60 m d'altitude. Ses versants sont convexo-concaves dans le secteur nord-est et rectilignes au sud-ouest. Les pentes varient de 2% (versant SO) à 4.1% (versant NE). La vallée a un fond plat. Elle est alimentée par les apports issus des bas-fonds du nord-est et des collines de Bilèle au nord-ouest. Cette vallée constitue la zone par excellence des cultures de saison sèche, en raison de la disponibilité de l'eau pendant une bonne partie de l'année, mais également de ses potentialités agronomiques. Les types de sols sont dominées par des sols hydromorphes et de sols peu évolués organiques issus du démantèlement des cuirasses sus/sous-jacentes.

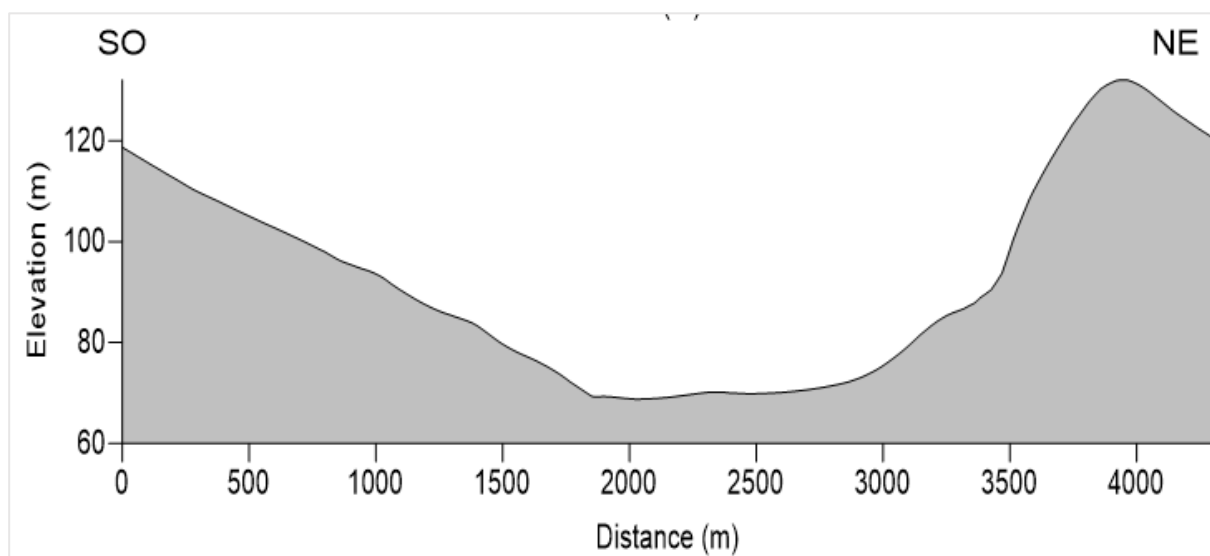


Figure 96. Profil en travers de la vallée de Gokodou

III.1.2.5. Le bassin versant du Kéwé

Situé entre les parallèles 12°29'30" et 12°34'30" et les méridiens 12°37'30" et 12°45'30", le bassin versant du Kéwé occupe une superficie de 44.42 km² et un périmètre de 49.5 km. Il est orienté SE/NW et parcourt 12.38 km d'amont en aval (Tab. 28).

Tableau 28. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin du Kéwé

Superficie	Périmètre	K _C	L	<i>l</i>	D	I _g	D _s	I _p Roche	L. talweg	Pente talweg	T _c
km ²	km		km	km	m	m/km	m		km	m/km	Heure
44,42	49,5	2,08	22,8	1,9	87	3,8	25,4	2,2	12,38	7,03	2

Tableau 29. Morphométrie de la topographie du bassin du Kéwé

Alt. Max	Alt. Min	Alt. Moy	ΔH	Alt. Médiane	Quartile 75%	I _p moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
186	67	124,7	119	124,5	153,3	17,9

C'est de la confluence de deux cours d'eau (le Dakately et le Diouguel) que le Kéwé est né (Fig.97). Sa forme très allongée (K_c = 2,08), l'importance de ses pentes longitudinale et transversale (Fig.98-99), lui confère un temps d'acheminement (T_c) assez court des eaux de ruissellement d'amont en aval (Tab.28).

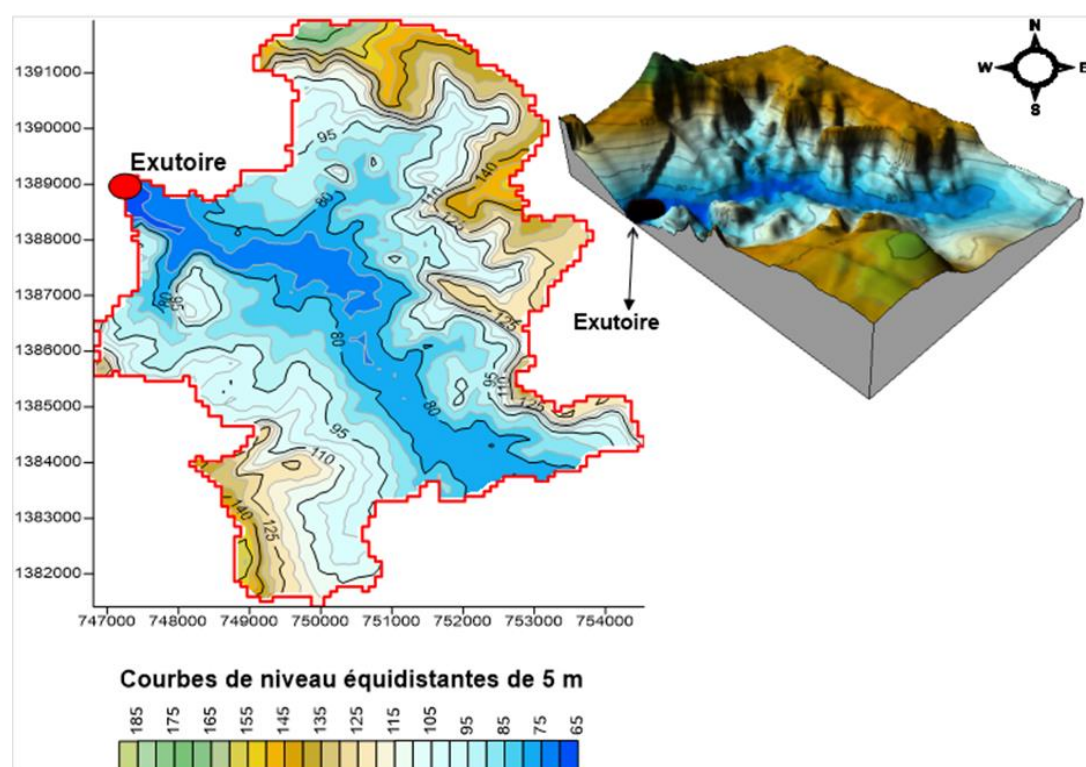


Figure 98. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Kéwé

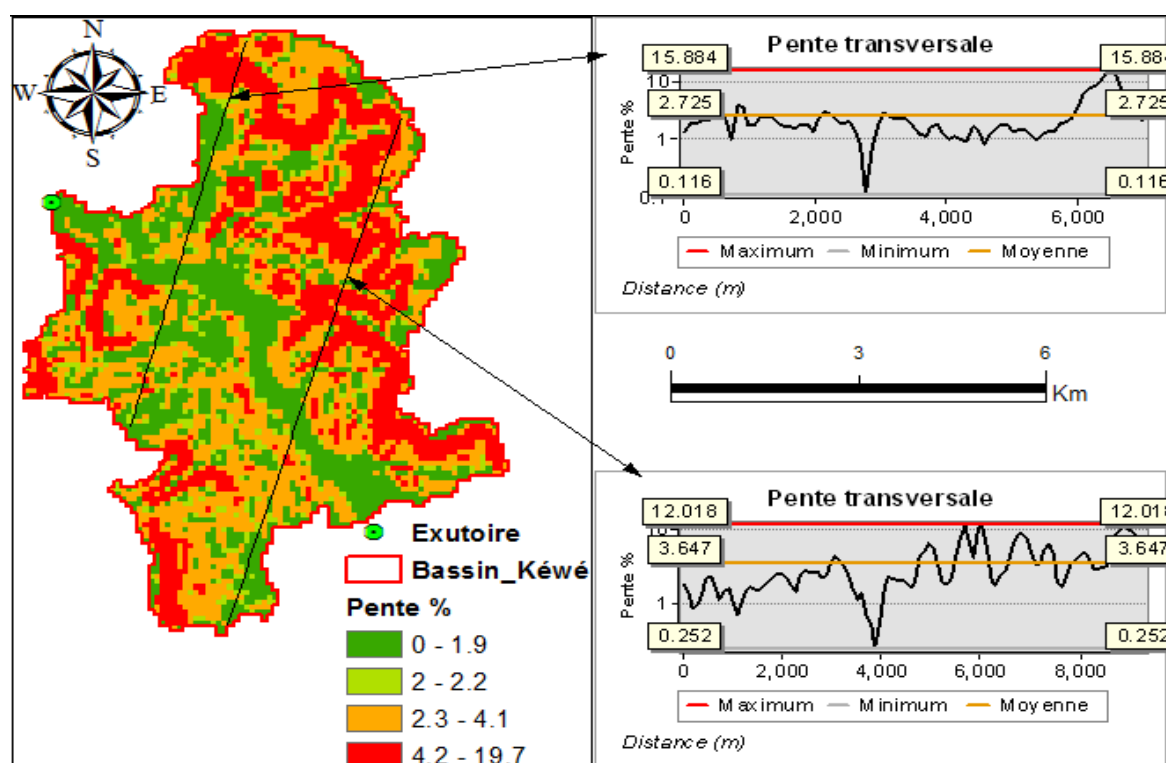


Figure 99. Répartition spatiale des pentes du bassin du Kéwé

L'examen de la figure 100 montre que le bassin du Kéwé est très ramifié avec un ordre 5 à son exutoire.

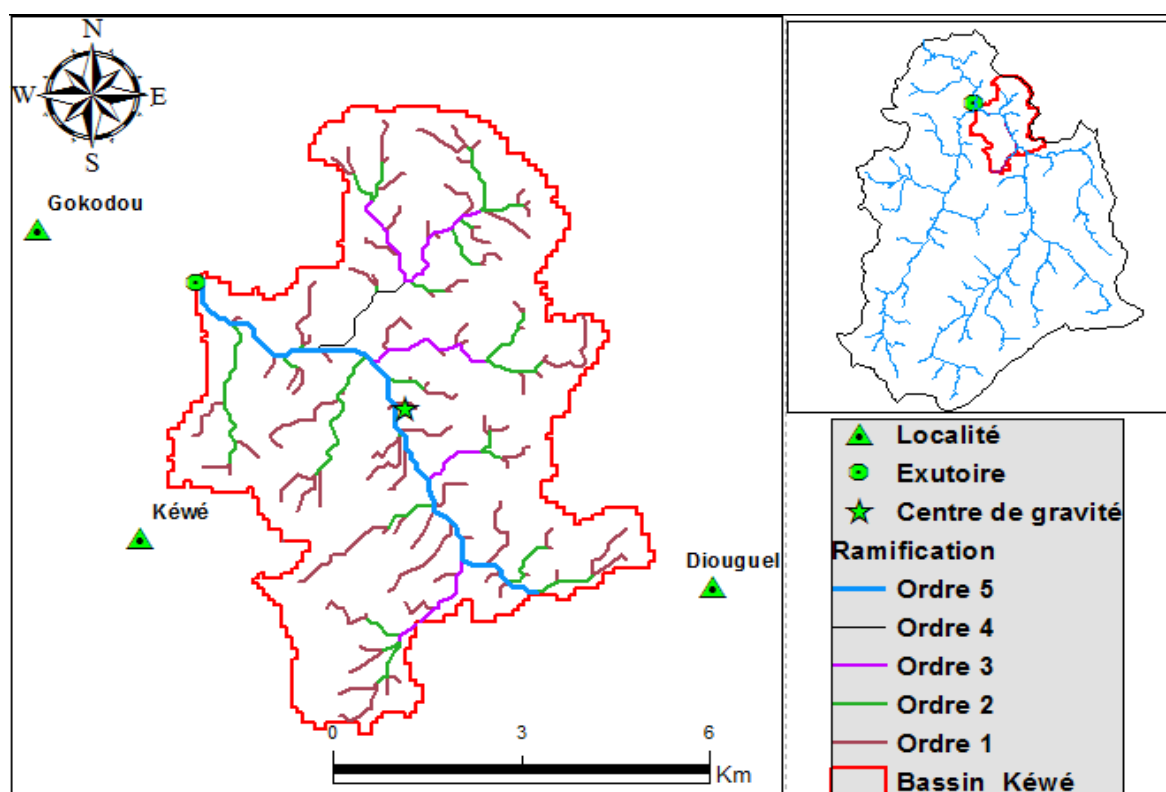


Figure 100. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Kéwé

III.1.2.5.1. Morphopédologie du bassin du Kéwé

Le bassin du Kéwé est couvert globalement par trois types de sols qui s'établissent sur différents niveaux topographiques (Fig.101). Il s'agit :

- ✓ des régosols associés à deux principaux faciès : sur matériau argileux d'altération (27% du bassin) et sur matériau gravillonnaire, qui couvre 30% de la superficie totale du bassin. Ces types de sols résultent du démantèlement des cuirasses sus-jacentes.
- ✓ Des lithosols sur cuirasse qui couvrent 2% de la superficie du bassin. Ces types de sols se retrouvent sur les sommets des collines de Kéwé qui culmine à environ 140m.
- ✓ Les sols alluviaux et sols peu évolués d'apports qui couvrent 41% de la superficie du bassin. On les retrouve généralement dans les lits des bas-fonds de Kéwé.

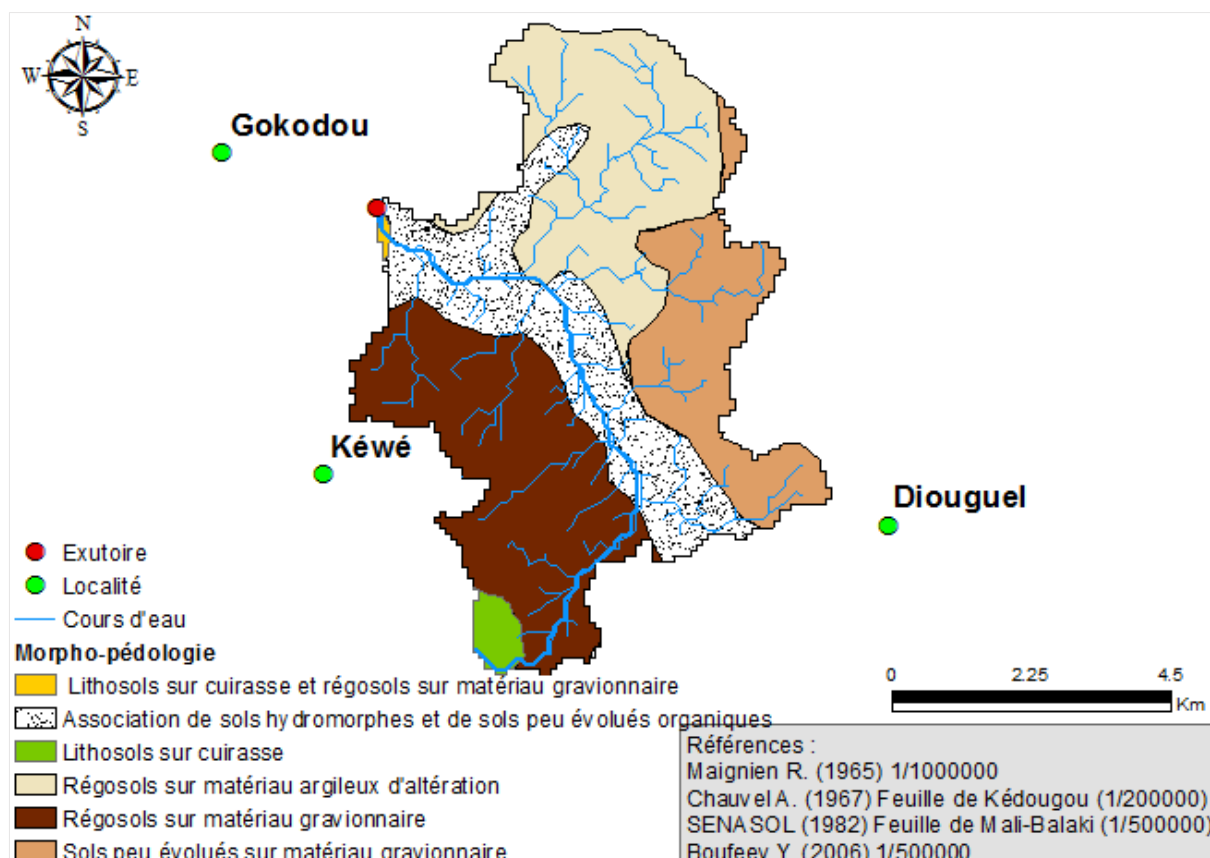


Figure 101. Bassin du Kéwé – Carte morphopédologique

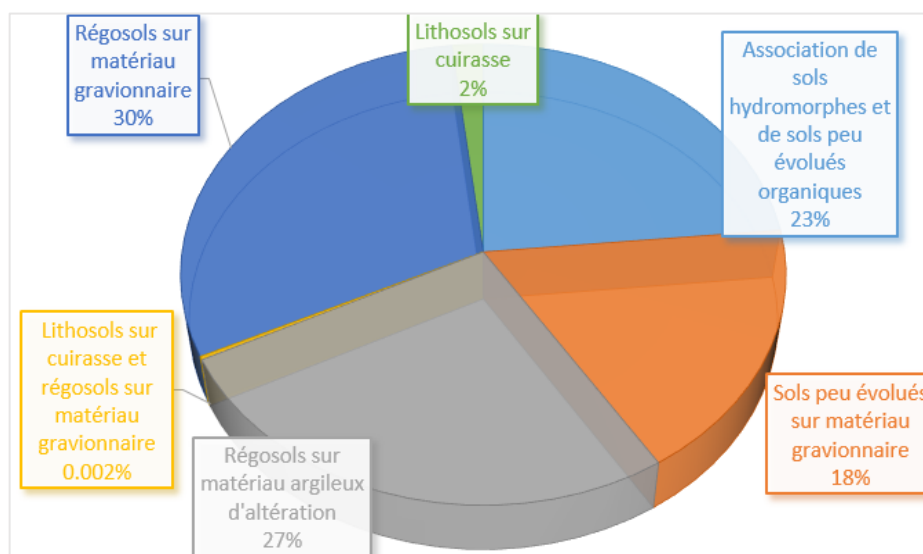


Figure 102. Bassin versant du Kéwé – statistiques en pourcentages des unités pédologiques.

III.1.2.5.2. Occupation des sols du bassin du Kéwé

Les unités d'occupation des sols du bassin du Kéwé sont dominées par la forêt galerie qui occupent une superficie de 18.7 km² soit 42% du bassin. Cette formation borde les berges du Kéwé et de ses affluents d'amont en aval. Elle est suivie par les bas-fonds qui occupent une superficie totale de 12 km² soit 27 % du bassin. Ce fort potentiel est, cependant, très faiblement exploité : seulement 44 hectares équivalant à 3.7% de la surface totale des bas-fonds sont mises en valeur. Les figures 103 et 104 présentent les unités d'occupation des sols identifiées et les proportions qu'elles occupent au sein du bassin.

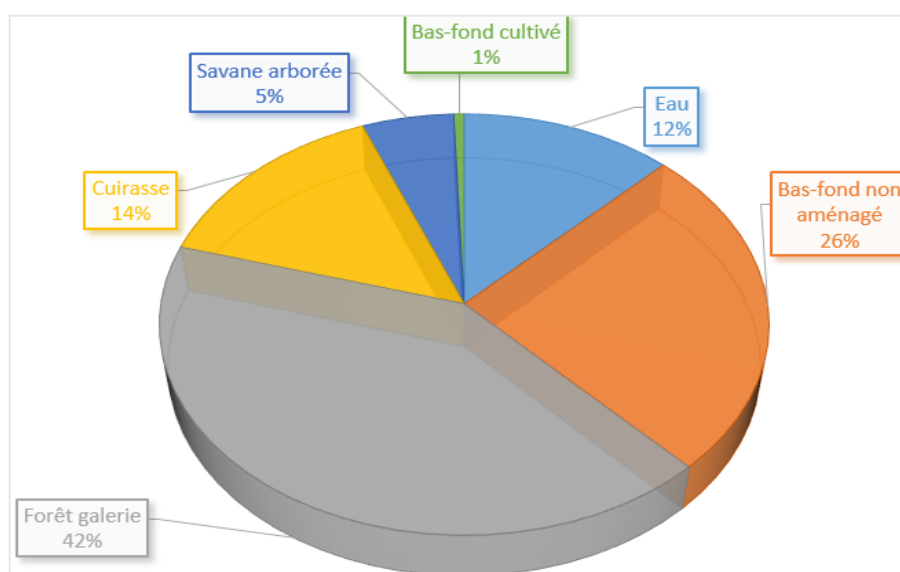


Figure 103. Bassin du Kéwé – statistique (%) des unités d'occupations des sols

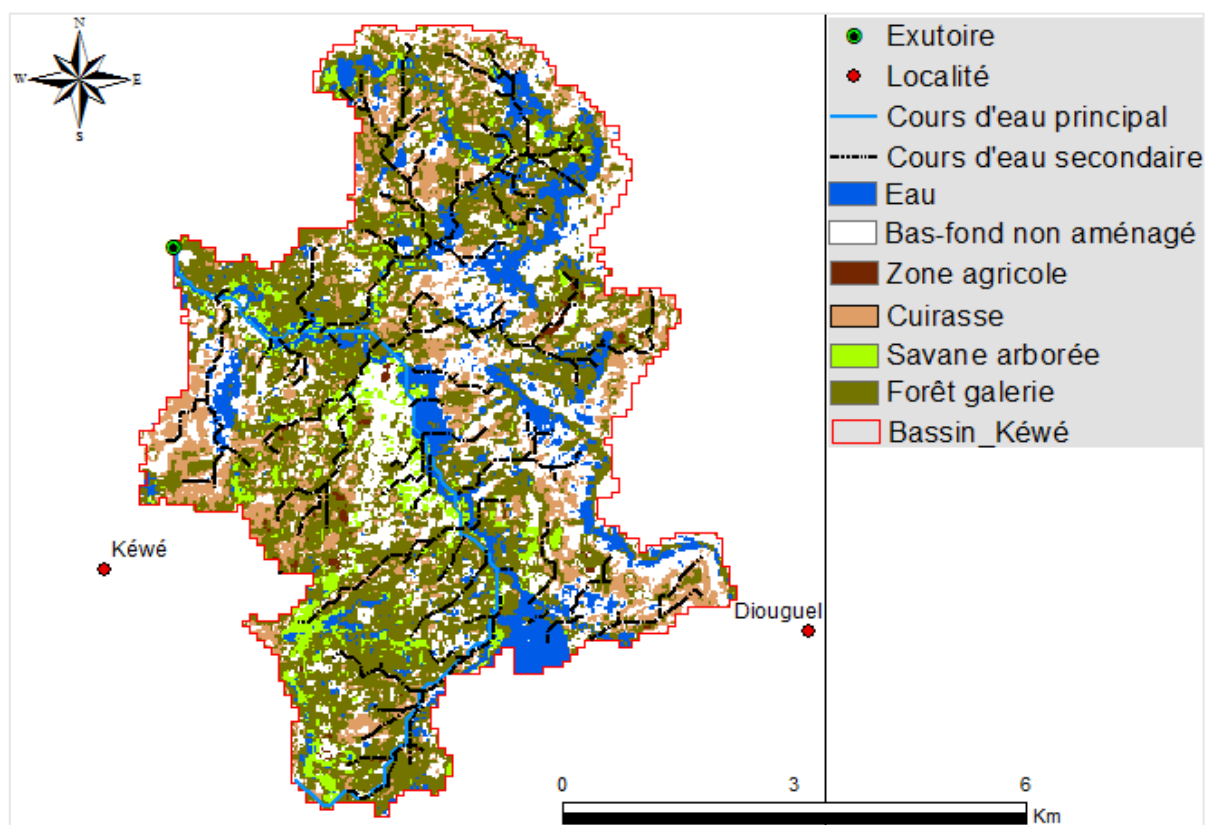


Figure 104. Bassin versant du Kéwé – Carte d’occupation des sols

III.1.2.5.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin du Kéwé

Le bassin versant du Kéwé compte 12 km² de zones inondables, localisées le long de son réseau hydrographique. Il s’agit des unités de bas-fonds interconnectées, de superficie comprise entre 3 et 5.1 km². Ils sont répartis entre les villages de Kéwé, Thiankoye et de Béhira-Foula qui les mettent en valeur.

Le bas-fond de Kéwé couvre 3.1 km² et s’étire sur 1.5 km de large. Il se caractérise par des versants rectilignes d’orientation NNW et SSE, et des pentes assez fortes (2.5%). Ce bas-fond se situe entre 100 et 80 m d’altitude et a une forme concave. Il est alimenté essentiellement par des cours d’eau d’ordre 2 issus des collines de Kéwé.

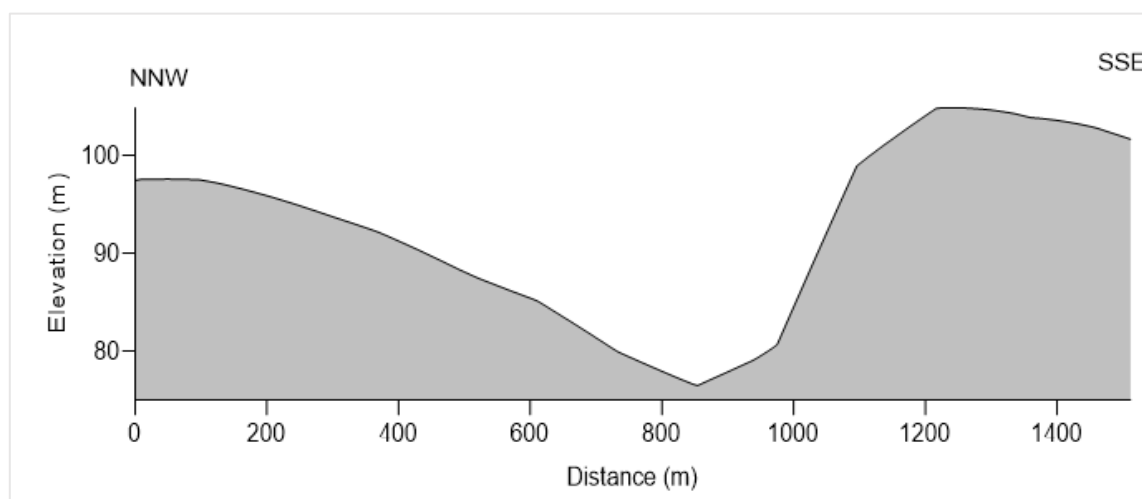


Figure 105. Profil en travers du bas-fond de Kéwé

Les bas-fonds des villages de Thiankoye et de Béhira-Foula s'étendent sur 4.1 km de long et 927 m de large, soit une superficie de 3.8 km². Il s'agit de plusieurs unités de bas-fonds interconnectées, qui sont situées entre 110 et 80 m d'altitude. Ils sont séparés par des versants convexo-concaves de pentes variables (2.5 à 3.8 %) selon le secteur. Ces pentes fortes isolent plusieurs inselbergs d'altitudes variant de 140 à 120 m et favorisent l'ensablement et l'engorgement rapide des bas-fonds durant la saison des pluies.

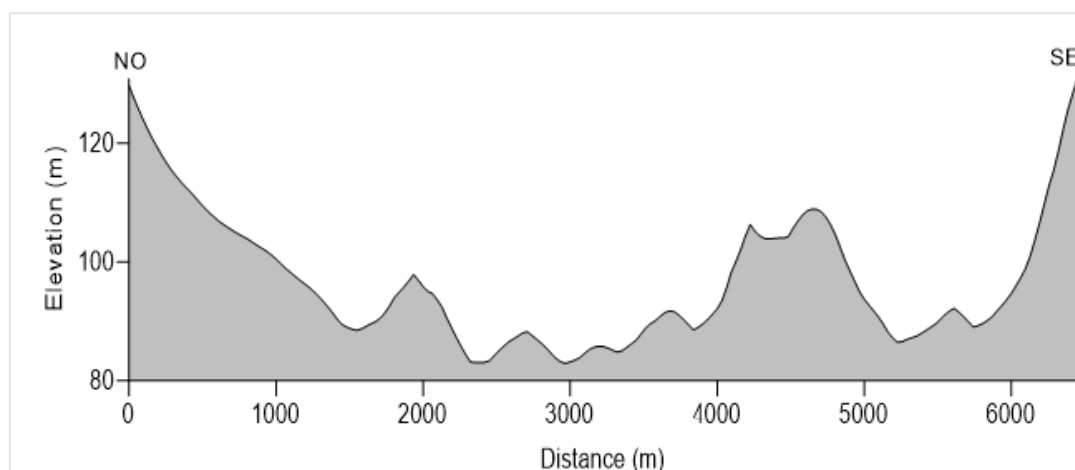


Figure 106. Profil en travers des bas-fonds des villages de Thiankoye et de Béhira-Foula.

Les bas-fonds des villages de Kéwé, Thiankoye et Béhira-Foula alimentent la vallée principale du bassin versant du Kéwé lorsqu'ils sont pleins. Celle-ci couvre 5.1 km² et s'étire sur 8.2 km de long et 622 m de large. La vallée a une forme concave, bien ramifiée (ordre 4 à son exutoire avec le Kéwé) et se caractérise par des versants convexo-concaves. Les pentes varient de 2.4 % (versant sud-ouest) à 1.8 % (versant nord-est) (Fig.107).

C'est dans cette partie du bas-fond où se développent les cultures rizicoles et de saison sèche en raison de ses fortes potentialités agronomique et hydrologique. Les eaux issues des bas-fonds intermédiaires (villages de Kéwé, Thiankoye et Béhira-Foula) se concentrent pendant une bonne partie de l'année dans la vallée principale du Kéwé offrant ainsi des opportunités pour le développement des cultures maraîchères. Ces activités génératrices de revenus contribuent au renforcement de la résilience à l'insécurité alimentaire et nutritionnelle des populations du bassin versant du Kéwé.

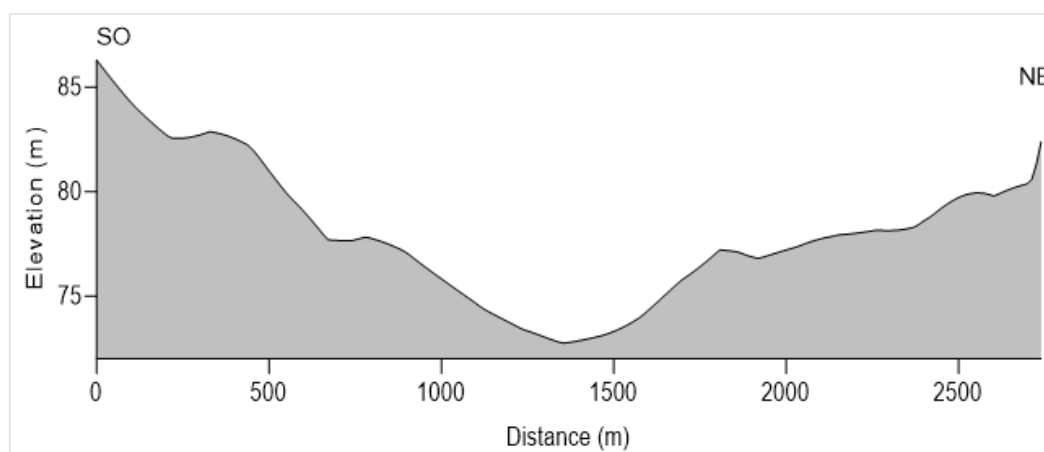


Figure 107. Profil en travers de la vallée principale du Kéwé

III.1.2.6. Le bassin versant du Mbéma

Le bassin versant du Mbéma, situé entre les latitudes 12°35 et 12°37 et les longitudes 12°43 et 12°47, est né de la confluence du Bilèle et du Kéwé. Il est orienté NE-SW et parcourt environ 10.7 km d'amont en aval. Il reçoit des apports issus des collines de Mbéma et de Dar Salam qui culminent à environ 188 m (Fig.108). Sa géomorphologie est constituée de trois unités morphologiques :

- les collines cuirassées d'altitudes comprises entre 100 et 188 m ;
- le moyen glacié constitués essentiellement d'argilites, de jaspes rouges et de grauweekes ;
- et les zones dépressionnaires (bas glacié) d'altitudes variant entre 55 et 75 m. Elles sont constituées essentiellement de sables et d'argiles (Cf. carte hydrogéologique).

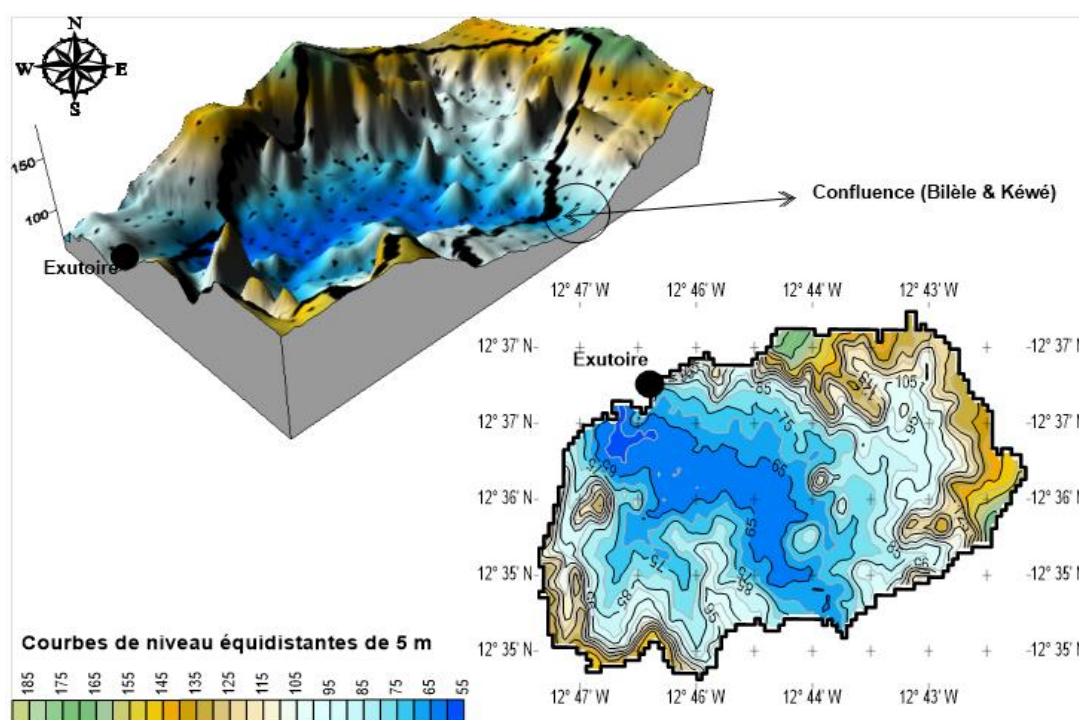


Figure 108. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Mbéma

Le tableau 30 qui illustre la synthèse des caractéristiques morphométriques et altitudinales du bassin du Mbéma montre que le Mbéma réagit très rapidement aux sollicitations du climat. Son temps de réponse à la pluie est estimé à 42 mn. Ceci est lié à sa compacité (K_c égal 1.66) et aux fortes pentes transversales et longitudinales (Fig.109).

Tableau 30. Synthèse des caractéristiques morphométrique et altitudinale du bassin du Mbéma

Superficie	Périmètre	K _C	L	<i>l</i>	D	I _g	D _s	I _p Roche	L. talweg	Pente talweg	T _c
km ²	km		km	km	m	m/km	m		km	m/km	Heure
31.57	33.3	1.66	14.5	2.2	114.1	7.9	44.3	3.1	10.7	10.64	1.4

Maximum	Minimum	Moyenne	ΔH	Médiane	Quartile 75%	I _p moyenne
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/km)
188	55	117.1	133	117	144	23

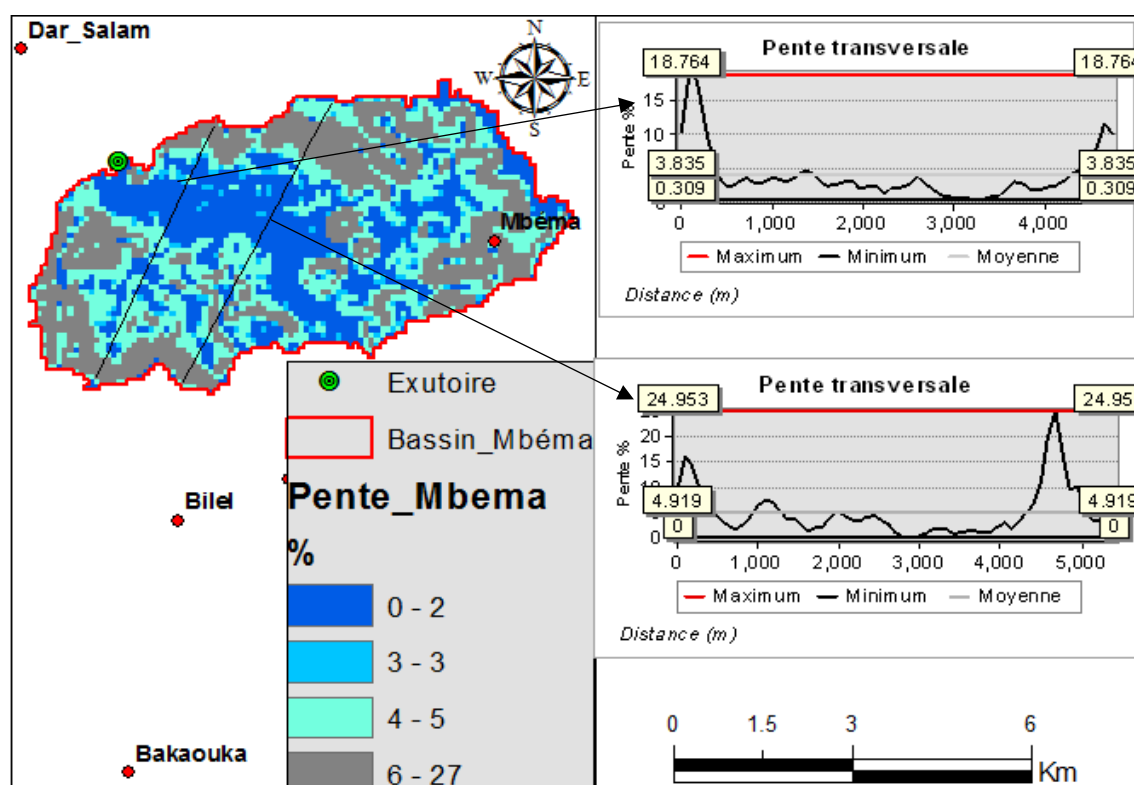


Figure 109. Répartition spatiale des pentes du bassin du Mbéma

L'analyse de sa courbe hypsométrique (Fig.110) montre que le bassin du Mbéma présente un relief très hétérogène. Plus 90% de sa topographie est constitué par des altitudes inférieures à 120 m.

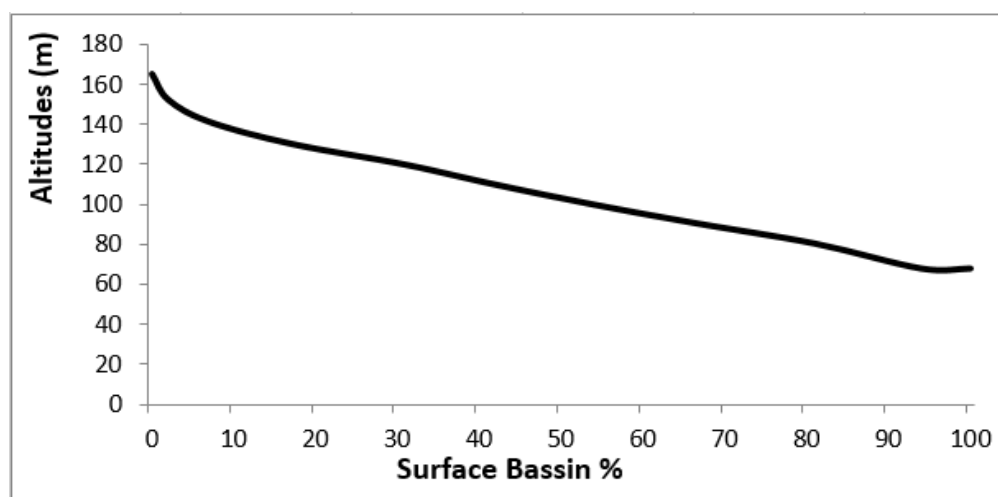


Figure 110. Courbe hypsométrique du bassin versant du Mbéma

Entaillé dans les jaspes rouges et les grauwackes du socle birrimien, le Mbéma présente toutes les caractéristiques des cours d'eau torrentiels. L'importance des apports des affluents (du fait de sa position aval), et ces fortes pentes lui confèrent un temps d'acheminement très court des eaux de ruissellement et donc une forte puissance érosive.

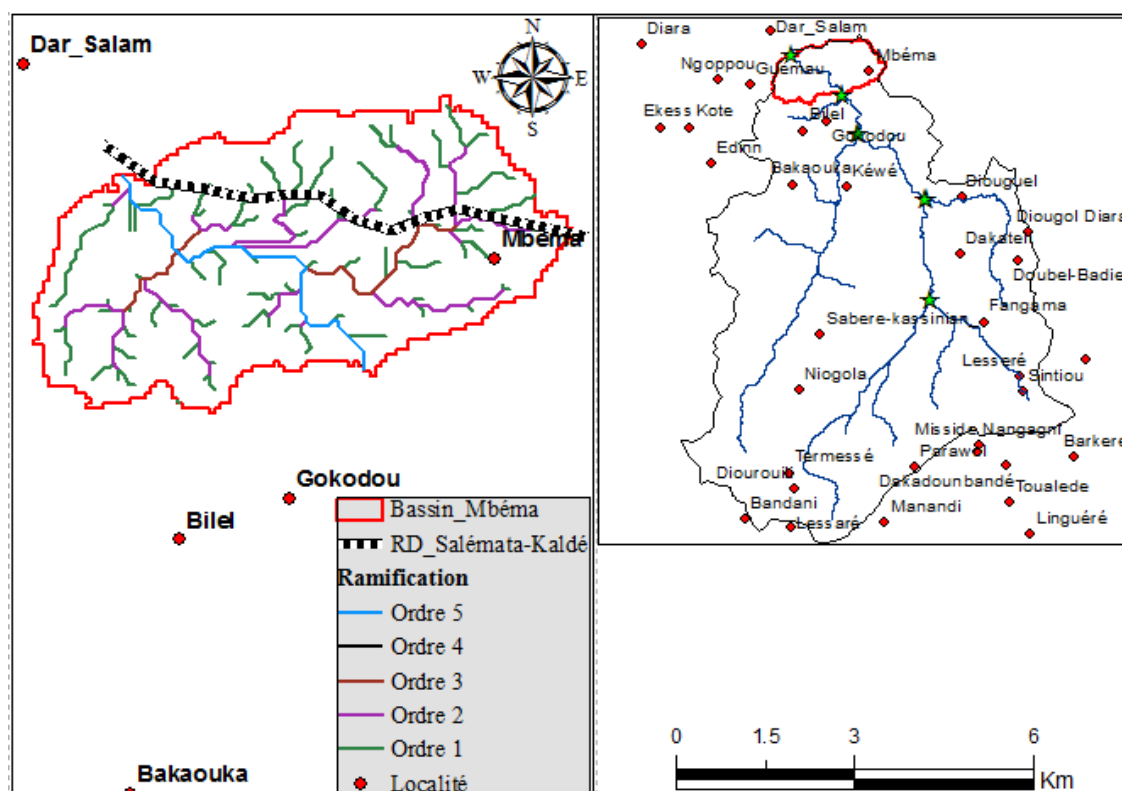


Figure 111. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Mbéma

III.1.2.6.1. Morphopédologie du bassin du Mbéma

Les unités pédologiques du bassin versant du Mbéma sont constituées de trois types de sols. Il s'agit des :

- ✓ régosols sur matériau argileux d'altération qui occupent une superficie de 13 km² soit 42% du bassin ;
- ✓ faciès de sols hydromorphes et de sols peu évolués organiques avec une superficie de 12 km² soit 38% du bassin ;
- ✓ et des lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravionnaire qui occupent une superficie de 6 km² soit 20 % de sa superficie.

Les figures 112 et 113 montrent les différentes unités pédologiques identifiées et les proportions qu'elles occupent au sein du bassin du Kéwé.

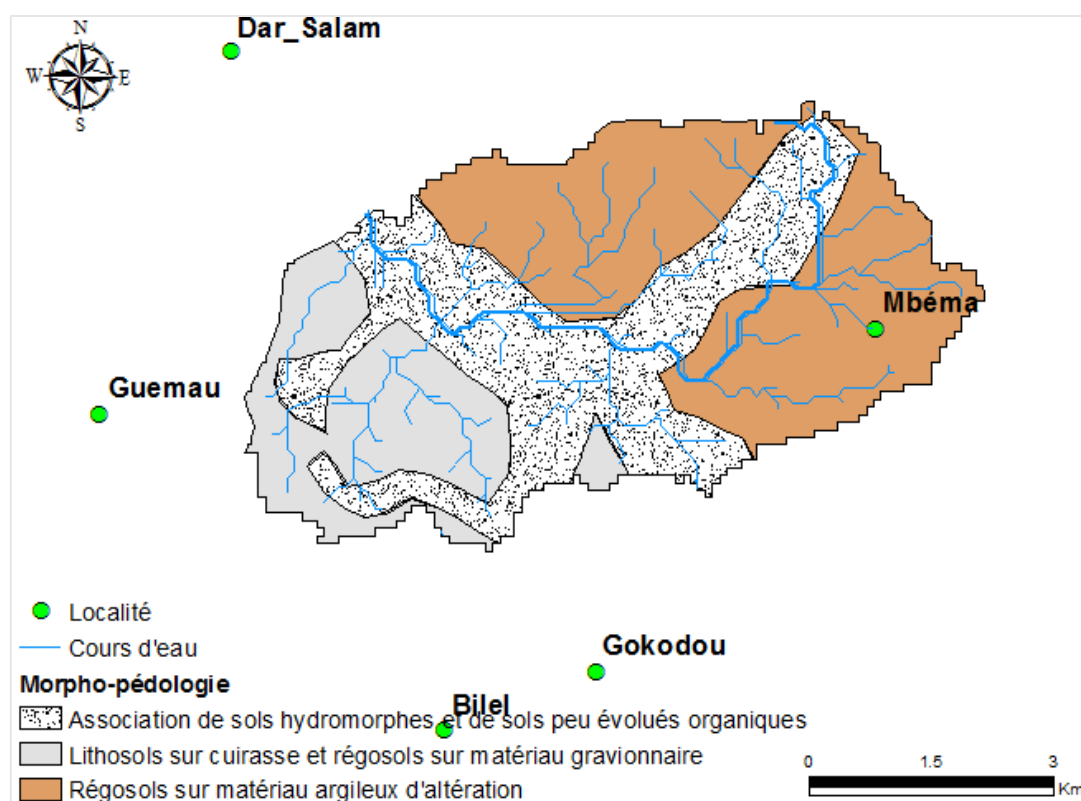


Figure 112. Bassin du Mbéma – Carte des types de sols

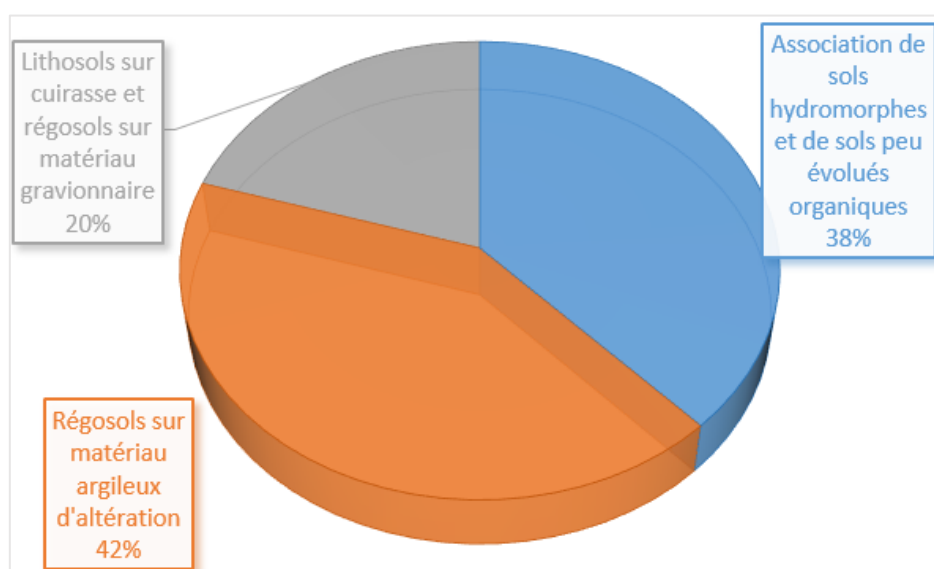


Figure 113. Bassin du Mbéma – statistiques (en %) des types de sols

III.1.2.6.2. Occupation des sols du bassin du Mbéma

Le bassin du Mbéma est marqué par l'importance de la forêt galerie qui occupe une superficie de 13.3 km² soit 42% du bassin. Cette unité paysagique borde les berges du Mbéma et de ses affluents d'amont en aval. Elle est suivie par les bas-fonds qui couvrent une superficie de 7.6 km² soit 24% du bassin. Mais, ce fort potentiel en bas-fond est très faiblement exploité, seulement une superficie de 63 hectares, équivalant à 8.3% de la superficie totale des bas-fonds, sont mis en valeur. Les figures 114 et 115 montrent les principales unités paysagiques identifiées ainsi que les proportions qu'elles occupent au sein du bassin du Mbéma.

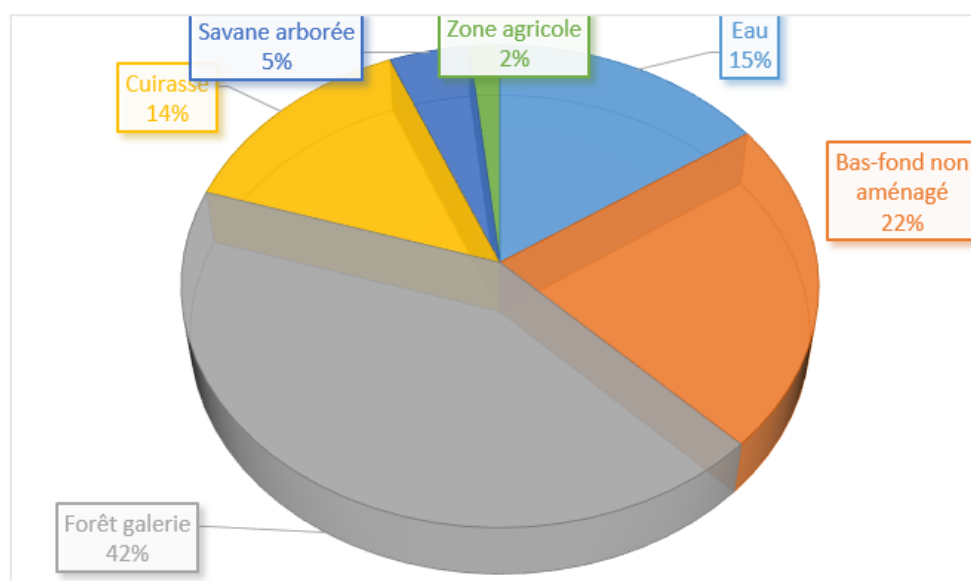


Figure 114. Bassin du Mbéma – statistiques (en %) des unités d'occupation des sols.

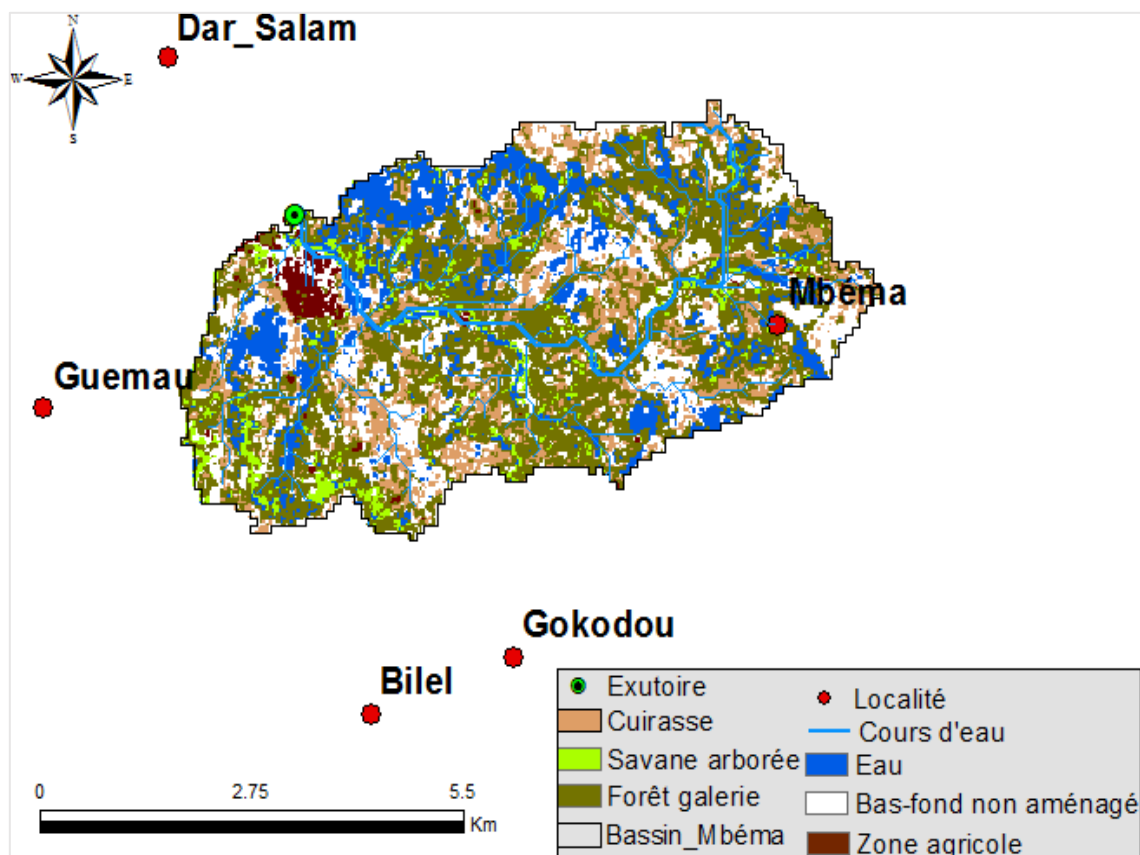


Figure 115. Bassin du Mbéma – Carte d’occupation des sols

III.1.2.5.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Mbéma

Il a été recensé 7.6 km² de zones inondables dans le bassin versant du Mbéma. Elles sont localisées le long de son réseau hydrographique. Il s’agit de petites unités de bas-fonds interconnectées, de superficies comprises entre 1.9 et 3.1 km², réparties entre les secteurs nord-ouest (axe Dar Salam - Guémau) et nord-est (village de Mbéma) du bassin du Mbéma.

Le bas-fond de l’axe Dar Salam - Guémau couvre 1.9 km². Il s’étire sur 527 m de large et 3.6 km de long. Il s’agit de deux unités de bas-fonds interconnectées, de superficie comprise entre 0.6 km² (village de Dar Salam) et 1.3 km² (village de Guémau). Elles sont situées entre 60 et 100 m d’altitude (Fig.116).

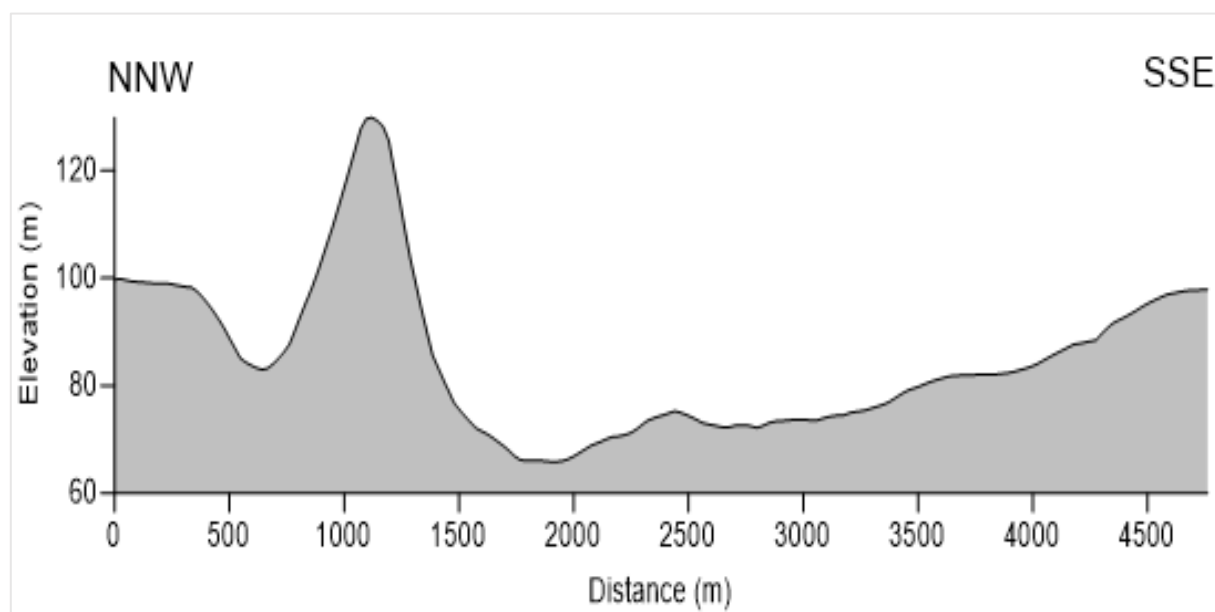


Figure 116. Profil transversal du bas-fond de l'axe Dar Salam - Guémau.

Le bas-fond du village de Mbéma couvre 2.2 km² et s'étire sur 846 m de large. Il est constitué de plusieurs vallons (mares) interconnectés qui sont séparés par des versants convexes (Fig.117). Les mares des parties hautes servent généralement à l'abreuvement du bétail pendant une bonne partie de l'année.

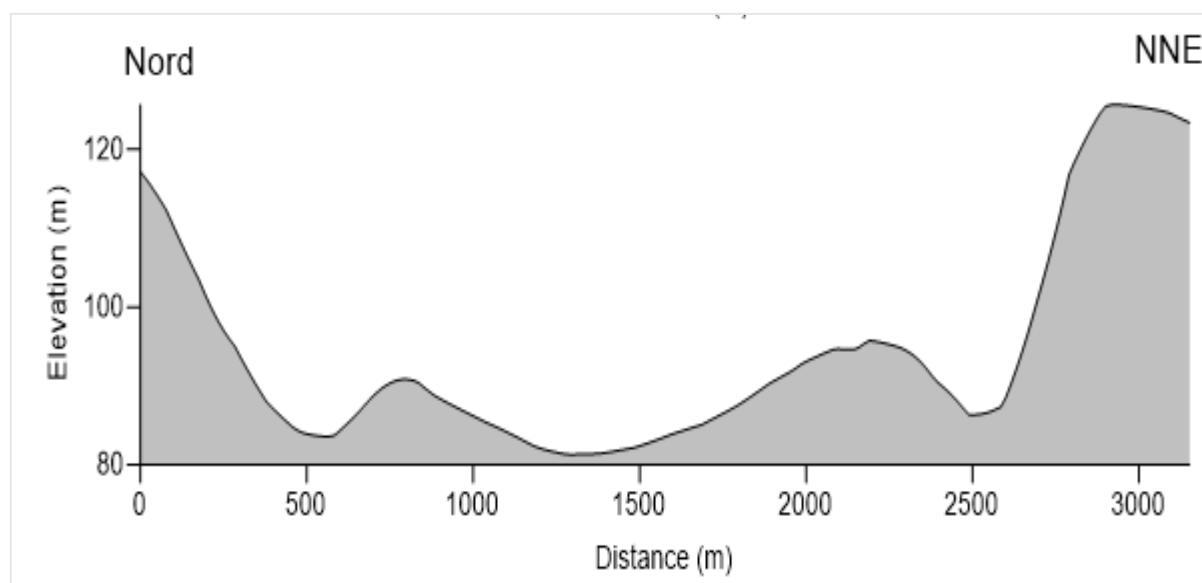


Figure 117. Profil transversal du bas-fond du village de Mbéma

La vallée principale du bassin versant du Mbéma couvre 3.4 km². Elle constitue la zone de convergence des apports issus des bas-fonds de l'axe Dar Salam – Guémau et du village de Mbéma. Il s'agit d'une large plaine alluviale, bien ramifiée (ordre 5 à son exutoire avec le

Mbéma) qui concentre l'essentiel des apports du Mbéma. C'est pourquoi, les activités agricoles sont surtout concentrées dans cette partie du bassin.

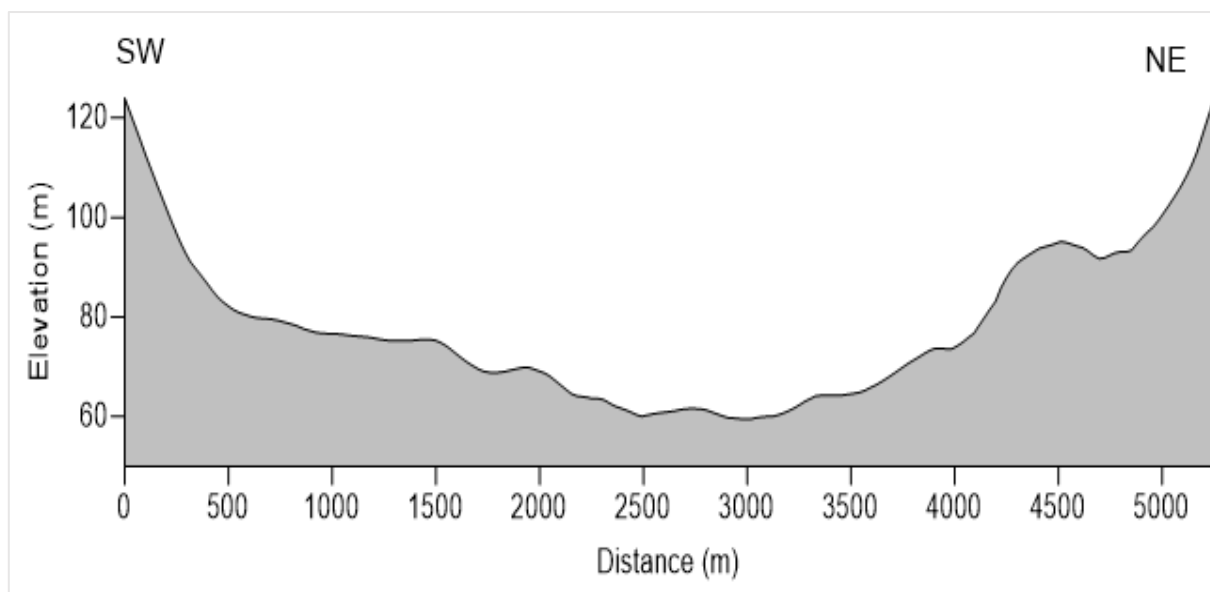


Figure 118. Profil transversal de la vallée principale du Mbéma

III.2. Analyse Statistique des Données Physiographiques

III.2.1. Etude de corrélation entre données morphométriques

Dans cette étude, treize paramètres morphométriques des sous bassins du Diarha ont été soumis à une Analyse en Composantes Principales (ACP), pour déterminer les affinités entre eux et déduire les paramètres les plus caractéristiques. Une matrice de corrélation a été utilisée et les composantes ont été déterminées selon le type de rotation des axes orthogonaux (rotation orthomax) pour faciliter la détection de groupes de variables corrélées. Cette analyse a été effectuée à l'aide du logiciel R et de son plugin *FactoMineR*.

L'ACP est une méthode statistique qui réduit le nombre de variables à celles qui sont les plus significatives par une représentation géométrique des observations et des variables. Il est largement utilisé dans la recherche de liens éventuels entre variables et individus et leur regroupement en régions homogènes (Chavent M., Kuentz V., et Saracco J., 2007 ; Baba Hamed K., et Bouanani A., 2016). La méthode a été appliquée à neuf individus (sous bassins) et treize variables (paramètres morphométriques) qui sont : la Superficie (S), le Périmètre (P), le coefficient de Compacité de Gravelius (KC), la Longueur (L) et la Largeur (l) du rectangle équivalent, la Dénivelée (D), l'Indice Global de pente (Ig), la Dénivelée Spécifique (Ds), l'Indice de Pente de Roche (Ip Roche), la Pente moyenne des versants (Pente moy.I), le Temps de Concentration (Tc), et la Longueur du talweg principal (L. talweg) et sa pente.

L'analyse de la figure 119 et du tableau des valeurs propres de la matrice de corrélation (Tab.31) montre que les trois premiers axes factoriels représentent le maximum d'informations. Ils expriment 95,9% de la variance totale, avec 51,83% pour le premier facteur, 38,27% pour le second, et 5,82% pour le troisième facteur.

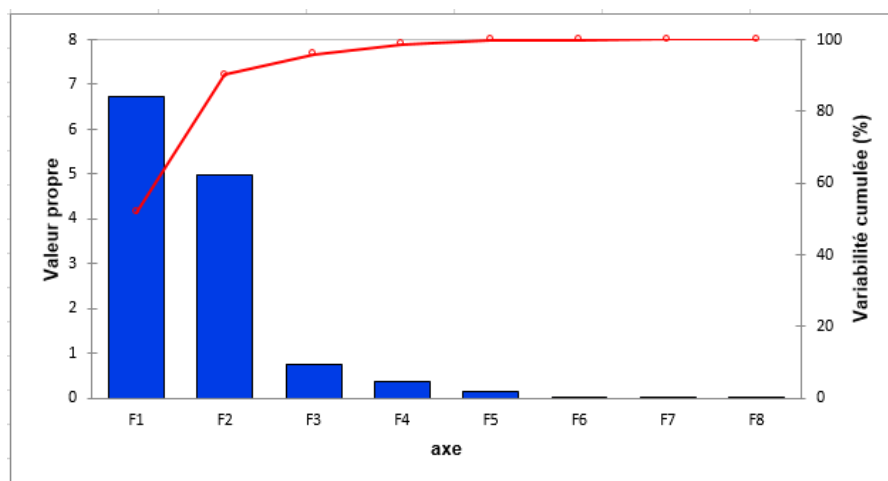


Figure 119. Distribution statistique des axes factoriels des variables

Tableau 31. Valeurs propres de la matrice de corrélation des paramètres morphométriques

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	6,738	4,976	0,757	0,361	0,140	0,015	0,011	0,002
Variabilité (%)	51,832	38,275	5,822	2,779	1,079	0,114	0,081	0,019
% cumulé	51,832	90,106	95,928	98,707	99,786	99,90	99,981	100

L'analyse de la matrice de corrélation (Tab.32) montre que la surface (S) est bien corrélée avec toutes les variables étudiées à l'exception des indices de pente et de compacité (Ig, Kc, Ip. Roche, Pente moy (I) et la pente du talweg principal) où on note une très mauvaise corrélation. Les résultats obtenus pour le temps de concentration (Tc) montrent qu'il est bien corrélé avec la taille des bassins versants, la longueur du rectangle équivalent et celle du talweg principal, par contre il l'est moyennement avec la largeur dudit rectangle.

Le coefficient de compacité (Kc) est bien corrélé négativement avec l'indice global de pente (Ig) et l'indice de pente de Roche (Ip. Roche), et moyennement bien corrélée négativement avec la dénivelée spécifique (Ds) et la pente moyenne des versants (Pente moy. I). Ces relations confirment la présence d'une loi d'échelle déjà bien connue en hydrologie. Elle est notamment évoquée sous la forme d'une relation asymptotique dans plusieurs travaux (Menabde M., Veitzer S., Gupta V.K. *et al.* 2001 ; Mantilla R., Gupta V.K. et Mesa O.J., 2006).

Tableau 32. Matrice de corrélation entre les variables morphométriques

Variables	S	P	KC	L	I	D	Ig	Ds	Ip Roche	Pente moy (I)	L. Talweg	Pente talweg	Tc
S	1.000												
P	0.914	1.000											
KC	-0.175	0.209	1.000										
L	0.863	0.991	0.323	1.000									
I	0.874	0.689	-0.499	0.588	1.000								
D	0.915	0.726	-0.436	0.658	0.841	1.000							
Ig	0.022	-0.354	-0.915	-0.438	0.237	0.353	1.000						
Ds	0.834	0.564	-0.671	0.461	0.933	0.933	0.513	1.000					
Ip Roche	0.048	-0.329	-0.911	-0.414	0.257	0.397	0.993	0.542	1.000				
Pente moy (I)	0.200	-0.026	-0.671	-0.088	0.331	0.526	0.743	0.565	0.769	1.000			
L. Talweg	0.967	0.939	-0.091	0.894	0.853	0.819	-0.093	0.752	-0.084	0.125	1.000		
Pente talweg	0.204	-0.087	-0.572	-0.122	0.137	0.539	0.773	0.476	0.814	0.641	0.009	1.000	
Tc	0.807	0.885	0.138	0.861	0.701	0.535	-0.359	0.489	-0.374	-0.162	0.923	-0.344	1.000

S : Superficie, P : Périmètre, KC : coefficient de Compacité de Gravelius, L : Longueur du rectangle équivalent, I : largeur du rectangle équivalent, D : Dénivelée, Ig : Indice Global de pente, Ds : Dénivelée Spécifique, Ip Roche : Indice de Pente de Roche, Pente moy. (I) : Pente moyenne des versants, Tc : Temps de Concentration, L. talweg : Longueur du talweg principal.

Bonne Corrélation Corrélation Moyenne Mauvaise Corrélation

Les trois axes factoriels retenus mettent en évidence leurs relations avec les variables (paramètres morphométriques) étudiées (Tab.33). L'axe 1 (principal axe d'inertie) qui représente plus de 50% de la variance, est très bien corrélé avec la taille des bassins versants, la

dénivelée simple, la dénivelée spécifique, la largeur du rectangle équivalent et la longueur du drain principal ; mais il l'est moyennement avec la longueur dudit rectangle et le temps de concentration. L'axe 2, avec 38.27% de la variance, est très bien corrélé positivement avec l'indice global de pente et l'indice de pente de Roche, et négativement avec le coefficient de compacité. Par contre, il est moyennement bien corrélé avec la pente moyenne des versants et celle du drain principal. Cette dernière est assez bien corrélée avec l'axe 3 qui ne représente que 5.82% de la variance totale.

Tableau 33. Corrélation entre les variables et les trois axes factoriels retenus

	F1	F2	F3
S	0.977	-0.169	0.071
P	0.838	-0.518	0.162
KC	-0.349	-0.851	0.376
L	0.768	-0.589	0.241
l	0.926	0.063	-0.332
D	0.954	0.206	0.203
Ig	0.189	0.964	-0.072
Ds	0.918	0.357	-0.123
Ip Roche	0.214	0.972	-0.019
Pente moy (I)	0.374	0.741	0.163
L. Talweg	0.944	-0.303	-0.051
Pente talweg	0.283	0.771	0.521
Tc	0.752	-0.570	-0.232

Ces résultats obtenus sont synthétisés sur la figure120, qui illustre la projection des variables (paramètres morphométriques) et observations (sous bassins) actives sur les plans factoriels 1, 2, après l'application de la méthode de rotation orthomax. Cette projection met en évidence trois principaux groupes de bassins versants :

- le premier formé par les bassins versants de Bilèle, Gokodou et Mbéma, alimentés par les collines Bassaris, présente des similitudes sur les pentes (Ip Roche et Ig) ;
- le second groupe est formé par les bassins versants de Termessé, Fangama et Niogola. Alimentés par le Fouta Djallon méridional, ces bassins ont sensiblement les mêmes caractéristiques morphostructurales (dénivelée, largeur, pente longitudinale et du talweg principal...) ;
- et le troisième groupe constitué par les bassins versants de Kéwé, Diouguel, et Dakately. Ces bassins se rapprochent par leur coefficient de compacité (Kc) très allongée, qui varie entre 1.97 (Dakately) et 2.11 (Diouguel).

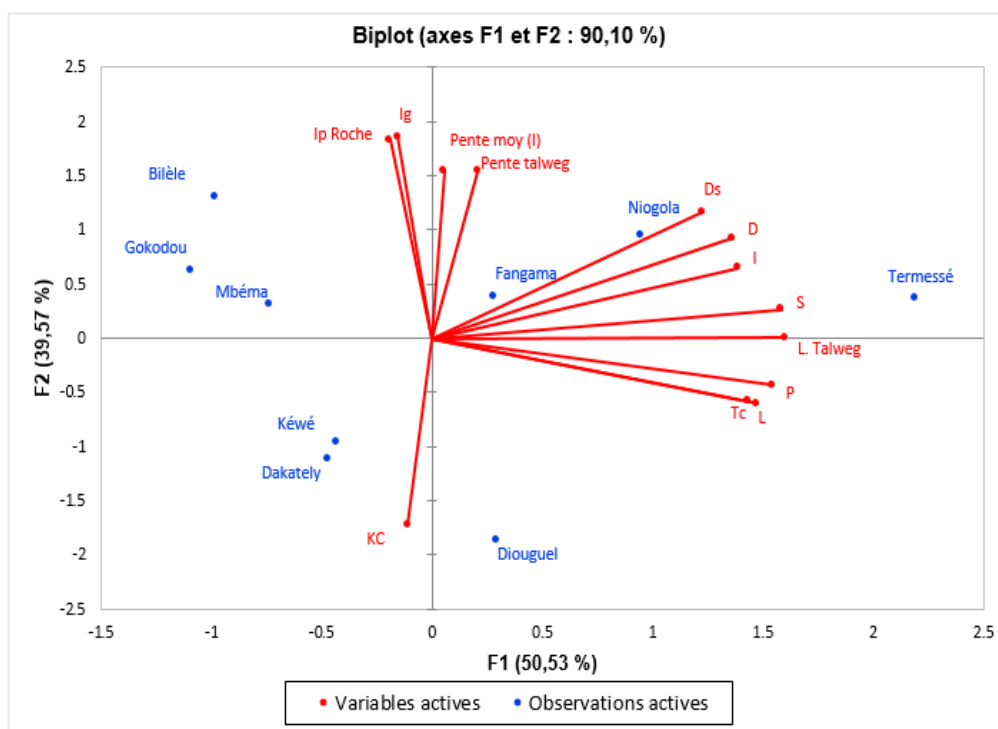


Figure 120. Contribution des variables et des observations actives sur les plans factoriels 1 et 2.

Les valeurs du cosinus carré ($\cos^2$) sont proportionnelles à la contribution d'une variable au regroupement en régions homogènes : plus le $\cos^2$ d'une variable est fort, plus elle contribue au regroupement. Le plugin *FactoMineR* a permis de sélectionner et d'afficher par ordre de grandeur les variables les plus contributives au regroupement en fonction de leur $\cos^2$.

Au terme de ces corrélations, sont retenues comme variables explicatives du regroupement : la Superficie (S), l'indice de pente de Roche (Ip Roche) et la dénivelée. Ces paramètres influenceront plus ou moins fortement la variabilité spatiale des régimes hydrologiques des sous bassins du Diarha.

III.2.2. Bassins Homogènes par Pédologie

La détermination des unités (bassins) homogènes par pédologie est capitale, car elle facilite la comparaison entre bassin et l'extrapolation de données pédologiques sur des sites non observés. En outre, elle permet de mieux caractériser les différentes aires contributives du ruissellement (Cosandey C., 2003).

Les types de sols des sous bassins du Diarha ont été analysés au travers de la méthode de l'ACP afin de déterminer les similarités entre bassin, du point de vue pédologique. Les résultats de la classification mettent en exergue trois unités pédologiques homogènes (Fig.121) :

- ✓ la première est formée par les bassins de Dakately, Kéwé, Diouguel, Mbéma, Gokodou et Bilèle. Il s'agit des bassins de la partie sénégalaise du bassin du Diarha où dominent les Sols Peu Evolué sur Matériau Gravionnaire (*SPEMG*), les Régosols sur Matériau Alluvial (*RMAL*) ou sur Matériau Gravionnaire (*RMG*) ;
- ✓ la seconde par les bassins de Niogola et de Fangama, dans la partie guinéenne, marqués par l'importance des Sols Squelettiques (*SSQ*) et des associations de Sols Ferralitiques (*SFER*) et de Sols Hydromorphes (*SHYDRO*).
- ✓ Et la troisième par le bassin de Termessé, à cheval entre le département de Salémata (Sénégal) et la préfecture de Koundara (Guinée). Ce bassin se caractérise par des faciès de Sols Ferralitiques (*SFER*) et de Sols Peu Evolué d'apport (*SPE*) dans sa partie amont (Koundara), et de Lithosols sur Cuirasse (*LC*) et Régosols sur Matériau Gravionnaire (*RMG*), dans sa partie aval (Salémata).

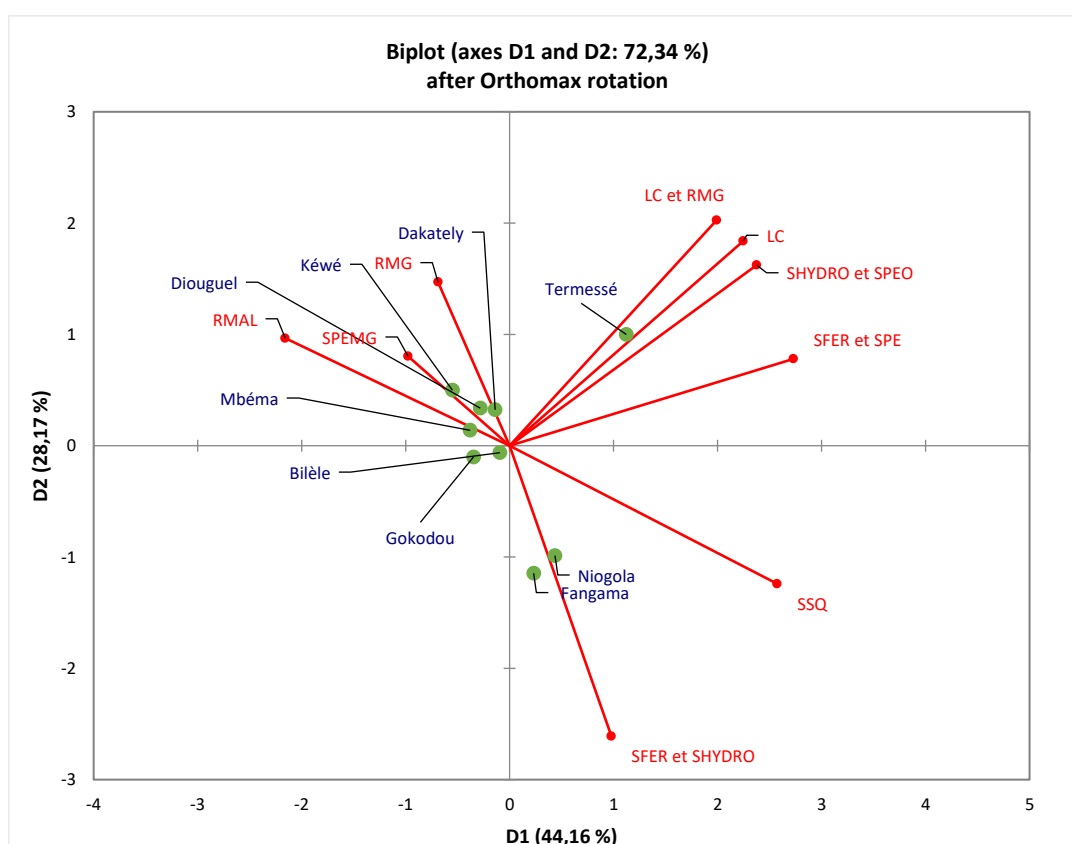


Figure 121. ACP montrant les similarités pédologiques entre les bassins

III.2.3. Typologie des bas-fonds en fonction des « unités paysagiques »

Les bas-fonds étant des zones d'épandage et/ou de réception des eaux de ruissellement leur fonctionnement est fortement corrélé aux caractéristiques des « unités paysagiques » des bassins élémentaires. Nous englobons sous le terme « unités paysagiques », les caractéristiques topographiques, morphopédologiques, morphométriques, lithologiques et d'occupation des sols des bassins versants étudiés.

Les unités paysagiques des bassins élémentaires et des bas-fonds ont été analysées au travers de la méthode de l'ACP afin d'établir une typologie des bas-fonds. Cette méthode a déjà été appliquée aux paramètres morphométriques des sous bassins et avait permis d'identifier les variables qui régissent le plus les modalités des écoulements. Il s'agit de la superficie (S), des pentes (Ig et IP Roche), la dénivelée (D), la longueur du drain principal ou distance de vidange, et des types de sols.

Au terme de cette classification, trois types de bas-fonds ont été identifiés dans le bassin versant du Diarha (Fig.122) :

- ✓ Les bas-fonds topographiquement situés en position basse (bas-fonds des « parties basses »). Il s'agit des bas-fonds des bassins versants de Diouguel, Kéwé, Dakately, Mbéma, Gokodou et Bilèle, situés entre 72 et 90 m d'altitude, avec des superficies comprises entre 3.5 km² (bas-fonds de Gokodou) et 29.6 km² (bas-fonds de Diouguel). Leurs pentes varient entre 0.5% (bas-fonds de Bilèle) et 1.1% (bas-fonds de Gokodou). Ils sont marqués, du point de vue pédologique, par des Sols Peu Evolués sur Matériau Gravionnaire (SPEMG), et des Régosols sur Matériau Alluvial (RMAL) ou sur Matériau Gravillonnaire (RMG). Ces types de sols se caractérisent par une texture fine argilo-limoneuse et argilo-sableuse et supportent une végétation de type savane boisée.
- ✓ Les bas-fonds topographiquement situés en position élevée (bas-fonds des « parties hautes »). Creusés entièrement dans les formations infracambriennes, ces bas-fonds se situent à plus de 100m d'altitude et se caractérisent par des pentes abruptes qui varient de 1.5% (bas-fonds de Niogola) à 3.5% (bas-fonds de Fangama). Leurs superficies sont comprises entre 38 et 42 km². Les unités pédologiques sont marquées par l'importance des Sols Squelettiques (SSQ) et des associations de Sols Ferralitiques (SFER) et de Sols Hydromorphes (SHYDRO). Sur ces sols se développent la forêt galerie, sur les flancs, et la savane arborée dans la partie centrale des bas-fonds.

- ✓ Et les bas-fonds topographiquement situés en position moyenne (bas-fonds des « parties intermédiaires »). Ils sont à cheval entre les formations infracambrienne et cambrienne du socle, constituées essentiellement de grès quartzites, des calcaires gréseux, des pélites et schistes calcaireux, dont l'altération physico-chimique a donné naissance à des faciès de Sols Ferralitiques (SFER) et Sols Peu Evolué d'apport (SPE), et de Lithosols sur Cuirasse (LC) et Régosols sur Matériau Gravillonnaire (RMG). Sur ces sols se développent une végétation de type savane boisée ou arborée, dans la zone centrale des bas-fonds, et de forêt galerie sur les flancs. Ces bas-fonds se situent à 92 m d'altitude en moyenne et se caractérisent par des pentes modérées (1.5%). Ils se rencontrent dans le bassin versant du Termessé.

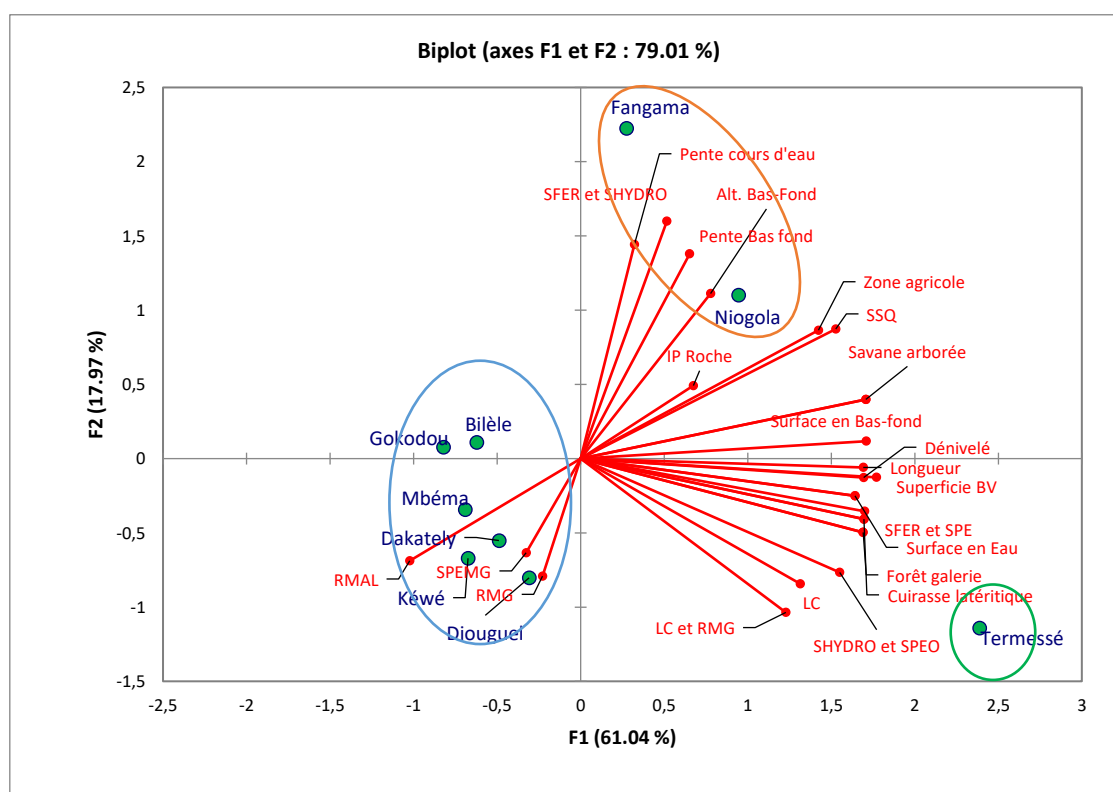


Figure 122. Classification des bas-fonds à l'aide de la méthode de l'ACP

Conclusion

Cette étude a montré la diversité et la richesse des agroécosystèmes de bas-fonds dans les sous bassins du Diarha, mais, qui demeurent jusqu'à présent sous exploités. Malgré les contraintes liées à la topographie et à la morphologie, avec l'intensité de l'érosion et l'ensablement des bas-fonds qui en résulte, ces unités du paysage constituent les rares milieux où les potentialités agronomiques, hydrologiques et sylvopastorales sont favorables à l'intensification agricole. Il s'agira à cet effet d'en tirer profit en améliorant la connaissance de leur fonctionnement par l'étude des périodes de submersion et leur durée, la forme et la dynamique des crues et de l'amplitude des variations saisonnières des altérites.

On a également montré, à travers cette analyse, comment l'utilisation des données morphostructurales et morphopédologiques pouvait permettre une régionalisation par la méthode de l'ACP. Cette régionalisation des paramètres physiographiques est essentielle dans une perspective de modélisation pluie-débit et d'extrapolation hydroclimatique.

CHAPITRE IV. ÉLÉMENTS DU CLIMAT ET VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE

« L'eau est le moteur de la vie mais elle sait aussi détruire, ravager, inonder. Elle suscite une prise de conscience de la nécessité de préserver ce bien précieux. Ainsi, pour l'utiliser plus efficacement et la protéger, il faut mieux la connaître »

Laurent Touchart

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la variabilité climatique à travers l'analyse d'un certain nombre de paramètres principaux mesurés principalement au pourtour du bassin du Diarha. Ces paramètres sont la conséquence de la circulation atmosphérique tropicale que nous n'aborderons pas ici car ayant fait l'objet de plusieurs études (Leroux M., 1983, Le Borgne J., 1988, Sagna P., 2007). Y sont abordés, d'une part, les conditions pluviogéniques qui conditionnent les précipitations, d'autre part, les éléments climatiques du bassin du Diarha qui ont une influence quantitative et qualitative sur la pluviométrie, pour enfin aboutir à l'étude de la variabilité pluviométrique, analysée aux échelles annuelle, interannuelle, mensuelle et journalière.

IV.1. Circulation aérologique

Le climat du bassin versant du Diarha est tropical avec ses variantes guinéenne et soudanienne dont les mécanismes et les processus sont commandés par les anticyclones saharo-libyen, de Sainte-Hélène et la dépression saharienne qui structurent et organisent les deux grandes saisons (saison des pluies et saison sèche) qui y sont notées (Thiaw I., 2015). Deux grands flux intéressent alternativement le bassin du Diarha (Fig.123) :

- l'harmattan, un alizé continental alimenté par l'anticyclone Saharo-libyen, régit en grande partie le temps pendant la saison sèche ;
- Le flux de mousson, émis par l'anticyclone de Sainte-Hélène, en saison des pluies, crée les conditions de pluviogenèse avec la remontée de l'équateur météorologique dans l'ensemble du bassin du Diarha.

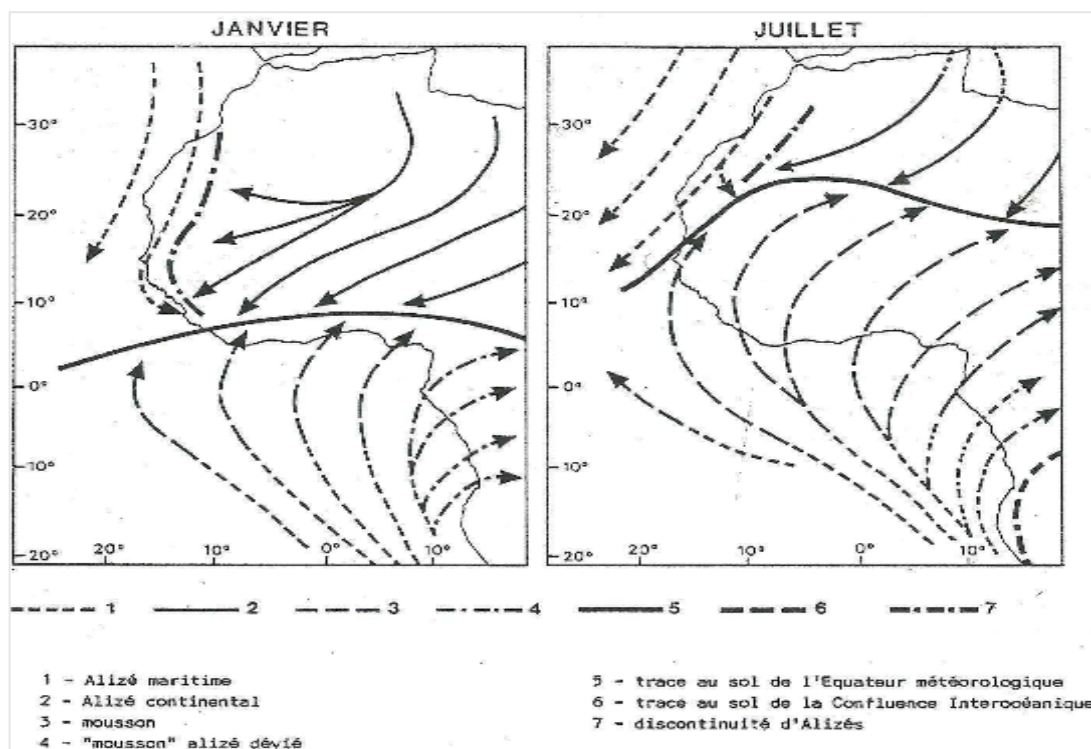


Figure 123. Circulation aérologique moyenne en Afrique de l'Ouest (Leroux M., 1983)

IV.2. Paramètres Climatiques

Les données mensuelles et/ou journalières de température, insolation, humidité relative, vitesse et de direction des vents observées sont issues des agences nationales de la météorologie du Sénégal et de la Guinée. Ces paramètres climatiques sont suivis au niveau des stations synoptiques et climatologiques de Kédougou et de Labé. Ces deux stations, bien qu'éloignées du bassin, donnent une indication de la variation des paramètres climatiques susmentionnés dans la région et par extension sur le bassin du Diarha.

IV.2.1. Les Températures

L'analyse des températures de la région met en évidence un gradient thermique décroissant du nord (Kédougou) au sud (Labé) suivant une évolution bimodale. Les deux maxima des températures moyennes mensuelles de Kédougou s'observent durant les mois d'avril et d'août avec respectivement 32,9°C et 28,2°C. Les deux minima sont notés pendant le mois de décembre (25,4°C) et en septembre (26,7°C). Alors qu'à Labé les maxima s'observent en avril avec 28,8°C et en juillet avec 26,1°C ; les minima y sont observés en décembre (23,5°C) et en août (23,5°C) (Tab.34).

Tableau 34. Températures moyennes mensuelles à Kédougou et Labé

Station de Labé (1950-2015)												
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Tmin (°C)	19,02	20,85	22,63	24,6	24,08	21,98	21,43	21,18	21,28	21,55	19,9	18,43
Tmax (°C)	29,28	31,37	32,52	33,02	31,12	28,01	26,04	25,76	26,42	27,42	28,46	28,62
Tmoy (T°C)	24,15	26,11	27,58	28,81	27,60	24,99	23,74	23,47	23,85	24,48	24,18	23,53
Ecart Type	1,17	0,96	0,92	0,61	0,62	0,49	0,39	0,44	0,36	0,58	0,78	1,06
CV	0,06	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06
Station de Kédougou (1960-2017)												
Tmin (°C)	17,47	20,41	23,45	25,80	26,05	23,68	22,26	21,95	21,50	21,79	19,48	16,92
Tmax (°C)	34,44	37,14	38,97	39,98	38,69	34,72	31,73	31,44	31,92	33,80	34,94	33,87
Tmoy (T°C)	25,96	28,78	31,21	32,89	32,37	29,20	27,20	26,70	26,71	27,80	27,21	25,40
Ecart Type	1,29	1,52	1,26	1,41	1,01	1,15	0,74	1,29	1,22	0,69	1,04	1,53
CV	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,04	0,06

La comparaison entre les températures maximales et celles minimales, représentées par les courbes de variation, tourne à l'avantage des températures maximales (Fig.124). Celles-ci influent fortement sur les températures moyennes mensuelles. Ces courbes de variation reflètent les conditions climatiques des deux saisons (la saison des pluies et la saison sèche), rencontrées dans le bassin du Diarha.

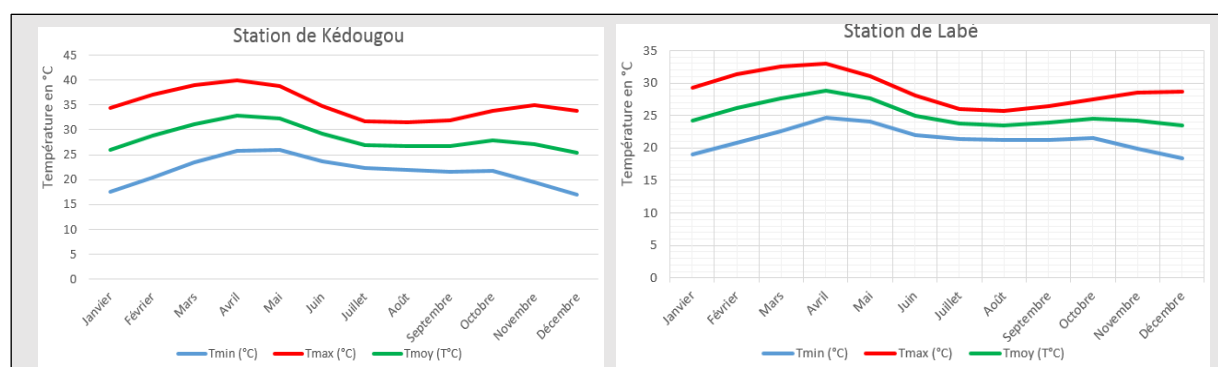


Figure 124. Moyennes mensuelles des températures à Labé (1960-2015) et à Kédougou (1960-2017)

D'une manière générale, l'apparition des maxima et minima principaux est liée au mouvement zénithal du soleil qui, en domaine tropical (auquel appartient notre aire d'étude), justifie un maximum en avril et un minimum en décembre. Cependant, les maxima et minima secondaires sont fonction des conditions météorologiques (humidité, nébulosité, etc.) pendant la saison pluvieuse.

IV.2.2. L'insolation

Cet élément peut être défini comme la durée du rayonnement solaire arrivant sur une surface bien déterminée. De cette énergie dépendent toutes les activités atmosphériques (évaporation, évapotranspiration, précipitations...). L'insolation est marquée dans la région par deux maxima et deux minima (Tab.35).

Tableau 35. Insolation moyenne mensuelle en heure à Kédougou et Labé

Station de Labé (1981-2001)												
	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ins. Moy (h)	265	241	258	235	206	186	152	143	161	198	237	254
Ins. Min (h)	220	179	187	135	120	147	119	85	71	172	212	187
Ins. Max (h)	297	276	304	305	249	219	201	192	203	235	280	308
Station de Kédougou (1984-2017)												
Ins. moy(h)	257,3	252,3	257,3	286,5	212,4	171	151,9	142,6	141	164,3	196,5	246,4
Ins. Min (h)	213,9	191,4	182,9	222	102,3	72	52,7	46,5	42	49,6	105	189,1
Ins. Max (h)	300,7	313,2	331,7	351	322,4	270	251,1	238,7	240	279	288	303,8

Comparé aux températures, on remarque sa forte influence sur leur variation saisonnière (Fig. 125). Ainsi, l'insolation est plus importante en saison sèche (décembre-avril) qu'en saison des pluies (mai-novembre). Les minima sont notés au cœur de la saison pluvieuse en juillet, août et septembre. Cette variation de l'insolation dans la région s'explique par l'influence des facteurs géographiques, de la nébulosité et de la succession des saisons. En effet, en saison sèche, la baisse de la couverture nuageuse entraîne la hausse des heures d'insolation. Le même phénomène est aussi observé en saison des pluies où la couverture nuageuse influe sur ce paramètre. Mais, le principal facteur de diminution des heures d'insolation est l'angle d'inclinaison de la terre sur l'écliptique ; le soleil est à la verticale du tropique du capricorne en décembre à midi, ce qui fait que les journées sont plus courtes dans les tropiques nord et en plus la lumière est plus oblique, donc l'énergie solaire sensiblement plus faible.

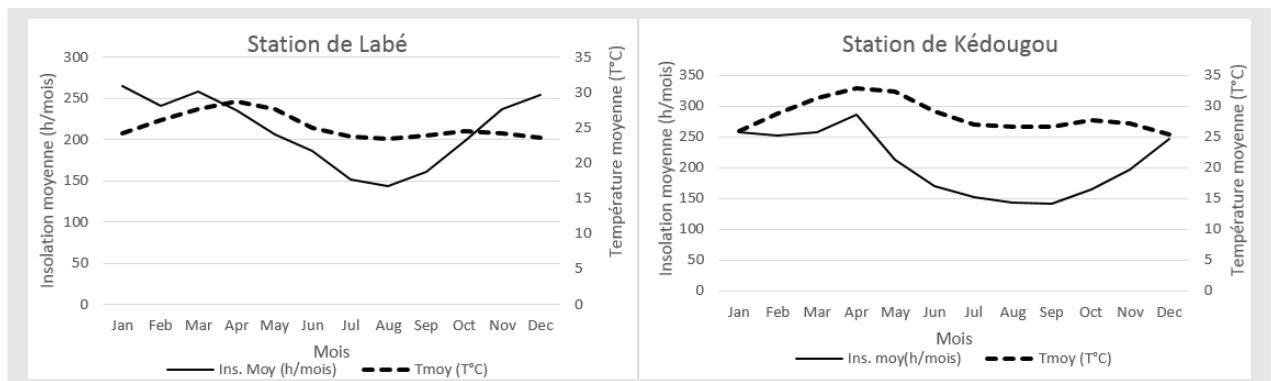


Figure 125. Moyennes mensuelles de l'insolation à Labé (1981-2001) et à Kédougou (1984-2017)

IV.2.3. L'humidité relative

L'humidité relative de l'air correspond à la quantité de vapeur d'eau dans l'air par rapport à la capacité maximale que ce dernier peut en contenir. Elle s'exprime en pourcentage et dépend de la température et de la pression. La lecture de la figure 126 montre dans la région une variation uni-modale de l'humidité relative. Les valeurs les plus élevées se situent en période pluvieuse et les plus faibles en saison sèche. Ces variations s'expliquent entre autres par la mousson qui intéresse la zone pendant la période pluvieuse, contrairement à la saison sèche pendant laquelle l'harmattan souffle dans la région.

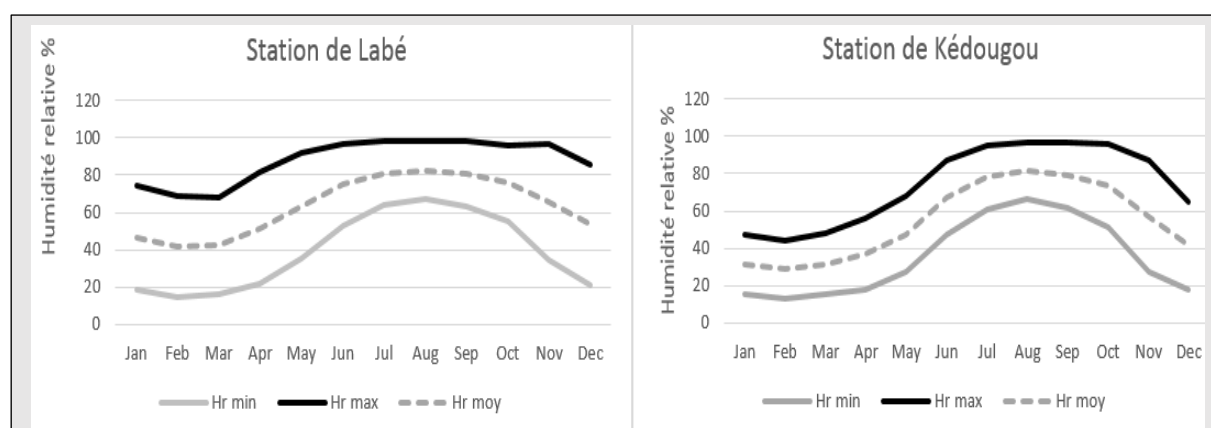


Figure 126. Moyennes mensuelles de l'humidité relative à Kédougou (1960 à 2017) et à Labé (1971-2001)

Tableau 36. Humidité relative moyenne mensuelle à Kédougou et Labé

Station de Labé (1971-2001)												
	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Hr. Moy (%)	47	41	42	51	64	75	81	83	81	76	66	53
Hr. Min (%)	18,4	14,4	16,2	21,6	35,6	53,0	63,8	66,9	62,9	55,3	34,7	21,0
Hr. Max (%)	75	69	68	81	92	97	98	98	98	96	97	86
Station de Kédougou (1960-2017)												
Hr. Moy (%)	31	28,5	31,5	37	47,5	67	78	81,5	79,5	73,5	57	41,5
Hr. Min (%)	15	13	15	18	27	47	61	66	62	51	27	18
Hr. Max (%)	47	44	48	56	68	87	95	97	97	96	87	65

IV.2.4. Vitesse et direction des vents

Le vent est un phénomène naturel qui se manifeste par le mouvement d'une masse d'air qui se déplace suivant une direction donnée et à une vitesse déterminée. Il s'agit de la trace au sol des flux de la circulation générale de l'atmosphère.

Les variations saisonnières de la vitesse du vent dépendent des flux en surface qui animent les saisons climatiques du bassin versant du Diarha. Les vitesses moyennes sont faibles et présentent une variation spatio-temporelle étroitement liée aux saisons. Elles sont plus faibles

en saison pluvieuse qu'en saison sèche. Les vitesses maximales sont enregistrées au mois de mars pour Labé avec 3 m/s, et en mai pour Kédougou avec 2 m/s. Ces valeurs maximales notées en mars à Labé et en mai à Kédougou, découlent des coups des vents forts dus à la présence de l'harmattan. Les minima sont notés en juin pour Labé (2,3 m/s) et en septembre pour Kédougou (2,5 m/s) (Fig.127). Ces flux déterminent les différents secteurs de vents notés.

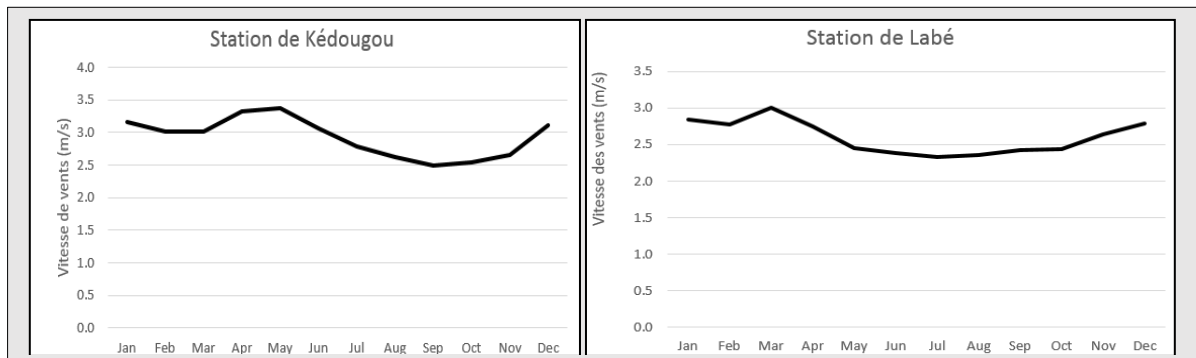


Figure 127. Moyennes mensuelles de la vitesse des vents à Kédougou (1980-2017) et Labé (1971-2001)

L'analyse du régime des vents à Kédougou (Fig.128) met en exergue, en fonction des saisons éoliennes, des vents de trajectoires différentes :

- De décembre à février, les vents du quadrant nord à est sont les plus fréquents. Dans cet ensemble, la direction est prime sur les autres secteurs (nord, nord-est, sud-est), avec près de la moitié des fréquences totales, 42% en décembre, 60,6% en janvier, et 63,6% en février (Tab.37). Aussi, bien souvent, sous de très faibles proportions, sont notées les directions SO, Sud, Ouest, NO. Les secteurs SO, Sud, faibles en décembre, sont inexistants en janvier et février. Un renforcement progressif est noté au niveau du quadrant Ouest à Nord qui, inexistant en décembre, passe de 6,1 % à 12,1 % de janvier en février.
- De mars à novembre : durant cette période ce sont les quadrants ouest à nord et sud à ouest qui, à travers leurs différents secteurs, enregistrent le plus de flux. De mars à avril, un renforcement des flux à dominance NO est noté : de 12,1 % en février, le secteur passe à 55 % en mars, puis à 69,7 % en avril. Les secteurs du quadrant Nord à Est s'affaiblissent. De 24,2 % en mars, les vents de direction est sont à 6,1 % en avril.
- En mai-juin : période des premières pluies, le secteur NO enregistre son maximum à 90,9 % au mois de mai. Les vents du quadrant nord à est demeurent faibles voire inexistants. Par contre le quadrant sud à ouest accentue son renforcement et atteint 30,6 % en juin.

- En juillet, août et septembre : au cœur de la saison des pluies, une légère apparition des vents du secteur nord du quadrant nord à est jusque-là inexistant est notée, avec une fréquence constante de 3 % en juillet et août. Le secteur ouest du quadrant sud à ouest enregistre un recul de sa fréquence par rapport au mois précédent, pour augmenter par la suite et atteindre son maximum en août (33,3 %). Mais, les flux à dominante NO, avec 81,8 % en septembre sont toujours très présents.
- En octobre-novembre : période transitoire de la saison pluvieuse à la saison sèche, bien que les flux du secteur NO persistent en enregistrant 24,2 % du total au mois de novembre, les vents du quadrant nord à est se renforcent, surtout en octobre où leur fréquence atteint 15,2 % du pourcentage total. Cependant la circulation des flux reste dominée par ceux du quadrant ouest à nord où le secteur NO accuse en octobre, une baisse notable de 9,1 % par rapport à septembre. Ce mois marque notamment une diminution des fréquences du quadrant sud à ouest. Les vents de direction ouest, très présents durant les mois antérieurs, observent une baisse brutale de leurs fréquences. De 33,3 % en août, on passe à 3 % en septembre.

En somme, il apparaît que la circulation des vents à travers la fréquence mensuelle des directions des vents à Kédougou, connaît deux grandes situations : la circulation d'harmattan qui se manifeste en saison sèche et la circulation de mousson en saison des pluies. De décembre à février (saison sèche), c'est la direction est qui domine ; et de mai à novembre (saison des pluies), les vents du secteur NO. Le tableau 37 présente la synthèse des directions dominantes des flux qui n'observent pas souvent à la station de Kédougou, leur trajectoire normale selon les saisons. En effet, de mai en octobre, lors de l'arrivée du flux de mousson de direction habituelle SO/NE, il est noté à Kédougou une prédominance du secteur NO.

Tableau 37. Fréquence et directions des vents dominants en % à Kédougou de 1980 à 2017.

Mois/directions	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
N	3,0	0,0	6,1	6,0	0,0	0,0	3,0	3,0	0,0	12,1	0,0	0,0
NE	18,2	12,1	6,1	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	12,1	30,3
E	60,6	63,6	24,2	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	21,0	42,0
SE	9,1	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	6,0
S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,0	3,0
SO	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	6,1	6,1	3,0	3,0	3,0	21,0	3,0
W	0,0	3,0	6,1	15,2	9,1	30,3	24,2	33,3	3,0	6,1	6,1	6,1
NO	6,1	12,1	55,0	69,7	90,9	63,6	63,6	57,6	81,8	72,7	24,2	0,0
Calmes	3,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	9,1	3,0	6,1	6,1

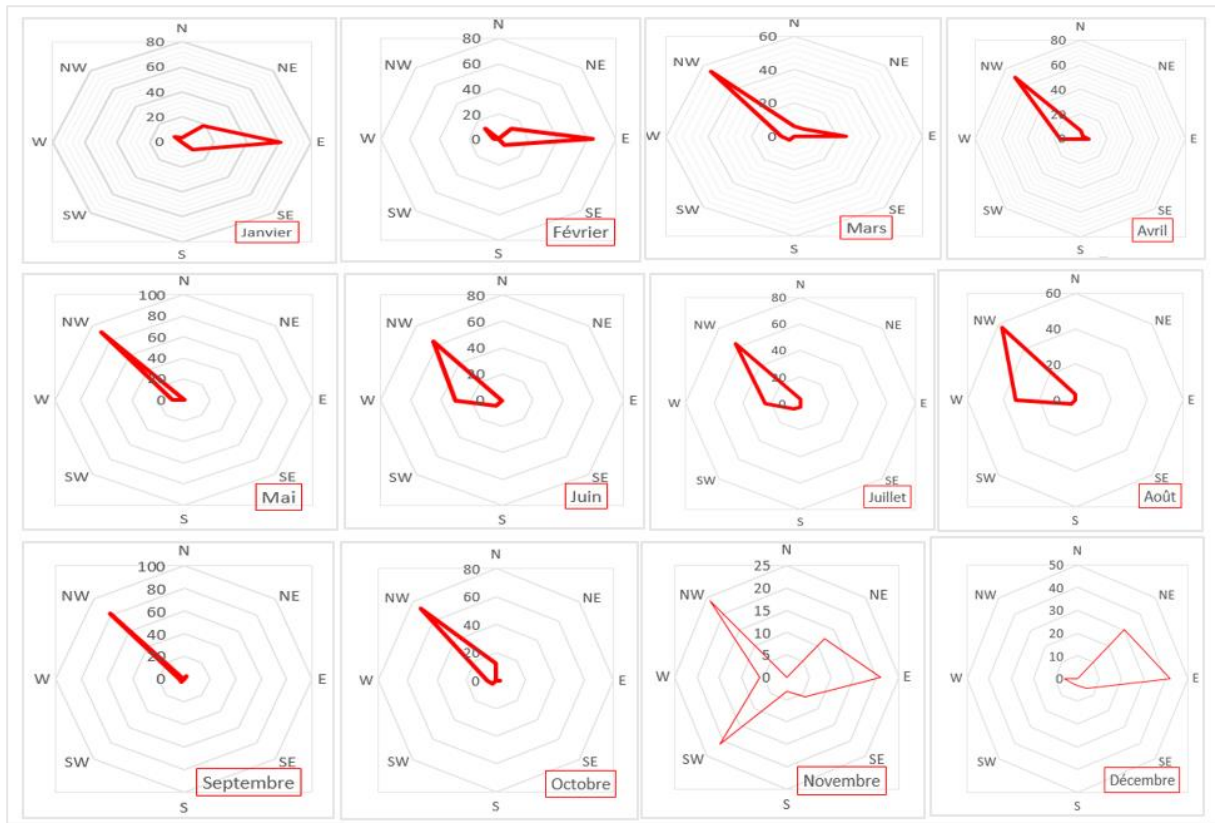


Figure 128. Fréquences des directions du vent à Kédougou (1980-2017)

Le régime des vents à Labé est marqué par deux périodes distinctes :

- De décembre à mars, où on note la prédominance des vents des secteurs Nord, Nord-Est et est liée aux incursions du flux d'harmattan. Les fréquences les plus élevées durant cette période correspondent surtout aux vents du secteur est qui atteignent leur maximum en janvier (76,5%) (Tab.38). À partir de mars, la fréquence des vents du quadrant nord à est baisse progressivement. Le mois d'avril assure la transition entre les vents de secteur SO et NE.
- De mai à août ce sont les vents du quadrant sud à ouest liés aux flux de mousson qui dominant. Le mois de septembre qui coïncide avec le balancement saisonnier du flux de mousson et d'harmattan traduit une mosaïque de circulation avec plusieurs directions. En octobre-novembre la circulation d'alizé se rétablit.

Tableau 38. Fréquences et directions des vents dominants en % à Labé de 1970 à 2001.

Mois/Directions	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
N	0	5,9	0	20,6	8,8	2,9	0	0	0	2,9	0	2,9
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENE	0	2,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	76,5	73,5	67,6	50	26,5	29,4	8,8	11,8	54,5	64,5	73,5	64,7
ESE	8,8	0	5,9	5,9	5,9	5,9	2,9	2,9	6,1	11,8	11,8	8,8
SE	14,7	8,8	8,8	2,9	8,8	14,7	0	8,8	18,2	8,8	14,7	11,8
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	5,9	0	2,9	8,8	2,9	3	0	0	0
SSO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO	0	0	0	0	0	2,9	0	2,9	3	0	0	0
OSO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	0	0	0	5,9	44,1	41,2	79,4	70,6	15,2	0	0	0
ONO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	2,9	0	0	0	0	0	0	0
NNO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

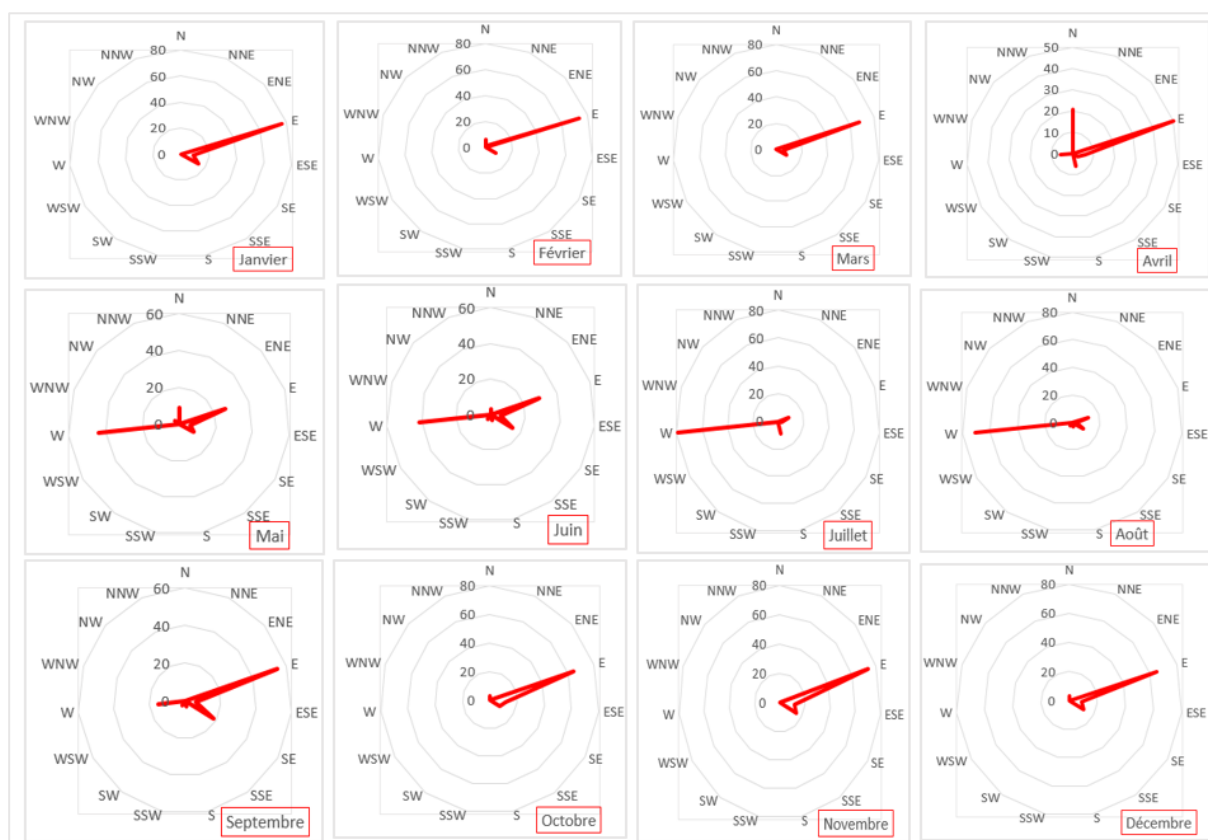


Figure 129. Fréquences des directions du vent à Labé (1970-2001)

IV.2.5. L'Evapotranspiration Potentielle (ETP)

L'Evapotranspiration Potentielle (ETP ou ETO) représente l'ensemble des phénomènes d'évaporation physique et de transpiration biologique. Composante essentielle du bilan hydrologique, elle permet de comprendre les mécanismes régissant les relations eaux de surface /eaux souterraines (Xu C.-Y., 2005). En outre, l'étude de ce paramètre présente un intérêt capital pour l'évaluation des besoins en eau d'irrigation et celle des fluctuations des niveaux piézométriques des nappes phréatiques, suite à des changements climatiques (Hamadi H. et Chiraz M., 2003).

En hydrologie de surface deux approches sont généralement utilisées pour estimer ce paramètre :

- une approche analytique basée sur la combinaison du bilan énergétique et les transferts de masse ;
- une approche hydrologique basée sur le bilan hydrologique sur parcelle expérimentale ou sur un bassin versant ; bilan de l'eau mesuré par un lysimètre ou à partir de l'évaporation bac.

Cependant, compte tenue de la lâcheté des réseaux de mesure et de la difficulté d'accès aux données au sol, plusieurs méthodes empiriques ont été développées pour estimer ce paramètre climatique parmi lesquelles celles de Turc L. (1961), McGuinness J.L. et Bordne E.F. (1972), Penman-Monteith (Allen R.G., Pereira. L.S., Raes D., *et al.*1998), et Oudin L. (2006). L'utilisation de ces modèles nécessite la connaissance de certaines données climatiques telles que les températures maximale et minimale, l'humidité relative maximale et minimale, la vitesse moyenne des vents et de l'insolation moyenne journalière.

Dans cette étude, la méthode de Penman-Monteith a été utilisée pour l'estimation de l'ETP, car elle a l'avantage de prendre en compte la majorité des paramètres qui influent sur l'évapotranspiration, comparé aux autres modèles qui n'estime ce paramètre climatique qu'à partir des températures moyennes (journalières ou mensuelles) et de la latitude de la station. L'ETP (Penman-Monteith) a été estimée automatiquement à l'aide du logiciel Cropwat 8.0 sur la période allant de 1960 à 2017 pour Kédougou et de 1950 à 2015 pour Labé (Fig.130).

L'examen de sa courbe d'évolution au cours de l'année renseigne sur son caractère bimodal dans la région avec deux maxima et deux minima. Elle est plus importante au nord (Kédougou)

qu'au sud (Labé) du bassin. Ces résultats montrent que l'ETP est fortement dépendant des facteurs météorologique, géographique, aérologique et cosmique. Enfin, sa détermination peut être utile dans l'évaluation de la réponse hydrologique d'un bassin versant aux impulsions pluviométriques, notamment comme données d'entrées des modèles pluie-débit (Bodian A., Dacosta H., et Dezetter A., 2011).

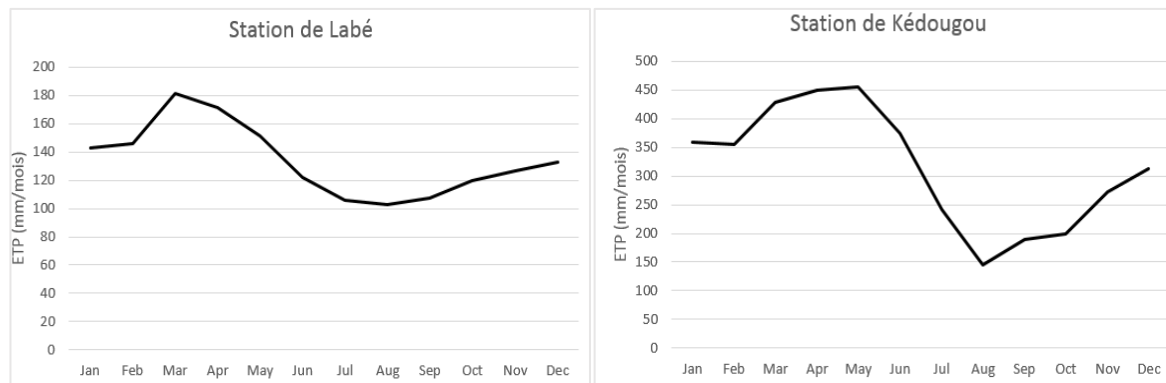


Figure 130. Moyennes mensuelles de l'ETP à Kédougou (1960-2017) et Labé (1950-2015)

En somme, le climat du bassin du Diarha est régi par l'importance des centres de hautes et de basses pressions à partir desquels les flux d'air sont propulsés. Il s'y ajoute l'influence du massif du Fouta Djallon qui réoriente les flux austraux car l'essentiel du bassin se situe en contrebas du versant sous le vent. La répartition saisonnière des principaux flux qui intéressent le bassin (Harmattan et mousson) influence la variabilité des paramètres climatiques comme les températures, la vitesse des vents, l'insolation, l'ETP, l'évaporation, l'humidité relative, et surtout la répartition et les caractéristiques des précipitations.

IV.3. Etude de la Variabilité Pluviométrique

En hydrologie de surface, les précipitations jouent un rôle essentiel dans la formation des écoulements et leur distribution temporelle. Elles constituent le premier facteur de l'écoulement en milieu tropical. Cependant son étude est confrontée à de grandes difficultés liées à la détérioration, au manque de suivi, de contrôle et d'entretien des réseaux de mesures. Ce qui fait que les données sont souvent lacunaires ou manquantes. Pour éviter ces écueils, l'hydrologue doit, avant toute analyse, vérifier et critiquer les données afin d'en apprécier la qualité et envisager les traitements nécessaires pour leur homogénéisation.

Cette partie traite de la variabilité pluviométrique aux échelles interannuelle, annuelle, mensuelle et journalière. Des tests de rupture sont réalisés à l'échelle annuelle.

IV.3.1. Etat des Données

Le bassin du Diarha est contrôlé par un ensemble de postes pluviométriques qui fournissent des données journalières et mensuelles des précipitations. Les données sont issues des agences nationales de la météorologie du Sénégal (ANACIM) et de la Guinée (DMN).

L'ensemble des données journalières et mensuelles ont été mises au format Hydraccess pour constituer une base de données pluviométrique (Vauchel P., 2004). Seize stations et postes pluviométriques ont été utilisés dans cette étude et la figure 131 en montre la répartition dans et autour du bassin. Ces postes pluviométriques sont mal répartis dans l'espace. Seuls trois stations (Salémata, Neppen Diakha et Dakately) dont les observations sont récentes se trouvent dans le bassin (Fig.131).

Le tableau 39 ci-dessous montre la disparité des données en termes de durée du suivi et de la qualité. Les stations de base comme Kédougou et Labé ont une durée d'observation respective de 100 ans et 87 ans, alors que les autres postes ont entre 5 ans (Oubadji et Laminia) et 52 ans (Fongolimbi) de suivi. La collecte des données journalières est la base du suivi permettant par la suite l'agrégation aux pas de temps mensuel, annuel et pluriannuel.

Tableau 39. Inventaire des données de pluies journalières observées

Longitude	Latitude	Id. Station	Description	Date Début	Date Fin	% lacunes	Durée (an)
-12.30	11.32	Labé	Pluies Journalières	1/1/1921	12/31/2008	17	87
-12.30	12.13	Mali (Guinée)	Pluies Journalières	1/1/1971	1/7/2001	38	16
-11.86	11.59	Koubia	Pluies Journalières	1/5/1977	10/29/1999	18	19
-12.30	12.53	Bandafassi	Pluies Journalières	1/1/1975	12/31/2014	16	34
-12.64	12.46	Dakately	Pluies Journalières	1/1/1980	1/1/2015	30	25
-12.01	12.25	Fongolimbi	Pluies Journalières	1/1/1963	1/1/2015	0	52
-12.22	12.57	Kédougou	Pluies Journalières	1/5/1918	12/31/2017	0	100
-12.62	12.12	Laminia	Pluies Journalières	2/5/1975	1/1/1981	15	5
-12.56	12.39	Neppen Diakha	Pluies Journalières	1/1/1980	12/31/2001	0	22
-13.05	12.67	Oubadji	Pluies Journalières	2/4/1975	1/1/1999	77	5
-12.38	12.72	Oussoukalla	Pluies Journalières	2/6/1963	1/1/1981	11	16
-12.25	11.08	Pita	Pluies Journalières	1/1/1950	2/7/1981	28	22
-12.82	12.63	Salemata	Pluies Journalières	1/1/1973	12/31/2014	15	36
-11.40	11.26	Tougué	Pluies Journalières	1/1/1968	11/9/2014	1	46
-13.29	12.48	Koundara	Pluies Journalières	1/1/1950	31/12/1994	0	44
-13.30	12.50	Youkounkoun	Pluies Journalières	1/1/1950	1/1/1995	9	41

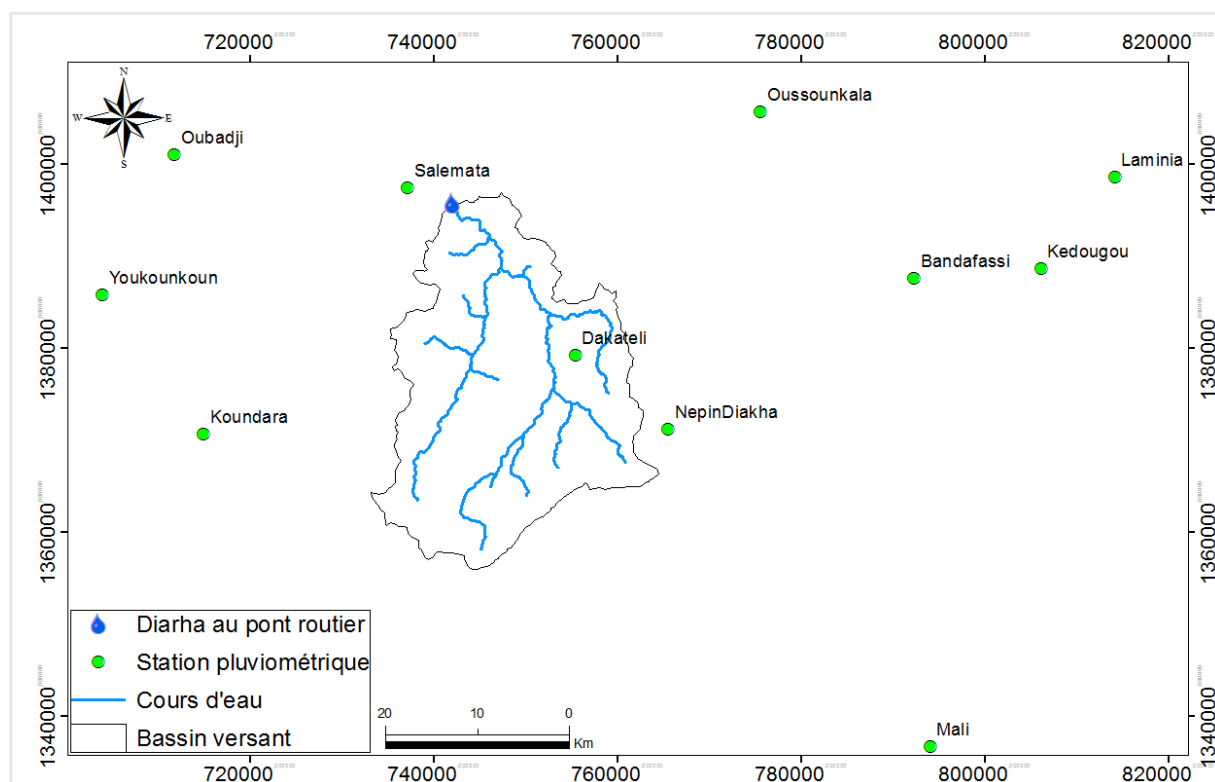


Figure 131. Carte de la situation du réseau pluviométrique du bassin du Diarha

IV.3.2. Homogénéisation des données

Les données pluviométriques collectées « passent souvent un certain nombre d'opérations dont la transcription et la saisie sur divers supports » (Brunet-Moret Y., 1969b). Elles présentent parfois des erreurs, avec parmi les plus fréquentes : les décalages du jour de pluie, le mauvais placement des virgules sur les valeurs, l'absence ou l'oubli de l'agent chargé de l'observation de la station. Ces erreurs « accidentelles » sont souvent à l'origine des valeurs aberrantes, des lacunes journalières, mensuelles, voire annuelles enregistrées sur les séries chronologiques de certaines stations.

L'homogénéisation des données est une démarche utilisée pour corriger les erreurs systématiques ou inconsistances, c'est-à-dire des erreurs dues à des changements d'instruments de mesure et à des relevées fantaisistes. Ainsi, pour vérifier l'homogénéité temporelle des séries de pluies annuelles, on utilise couramment la méthode des doubles cumuls (Brunet-Moret Y., 1971), qui consiste à comparer le cumul des pluies annuelles d'une station à celle d'une autre station de la même zone climatique et homogène dans le temps. Mais comme on ne sait pas à priori quelle station est homogène et qu'en fait, il faut les soupçonner toutes de défauts, la méthode des doubles cumuls s'avère difficile à appliquer.

Dans notre étude, nous avons utilisé la Méthode du Ratio Normal (MRN) en nous basant sur les travaux de Mohanty P.K., Panigrahi D. et Acharya M. (2014), pour combler et étendre les séries des différentes stations du bassin du Diarha. Ces auteurs ont mis au point un code logiciel de 389 lignes permettant, à partir de Microsoft Excel 3.1, de combler et d'étendre les séries pluviométriques des stations en se basant sur les précipitations moyennes annuelles ou mensuelles des stations. Les procédures du traitement sont consignées à la figure 132 suivante :

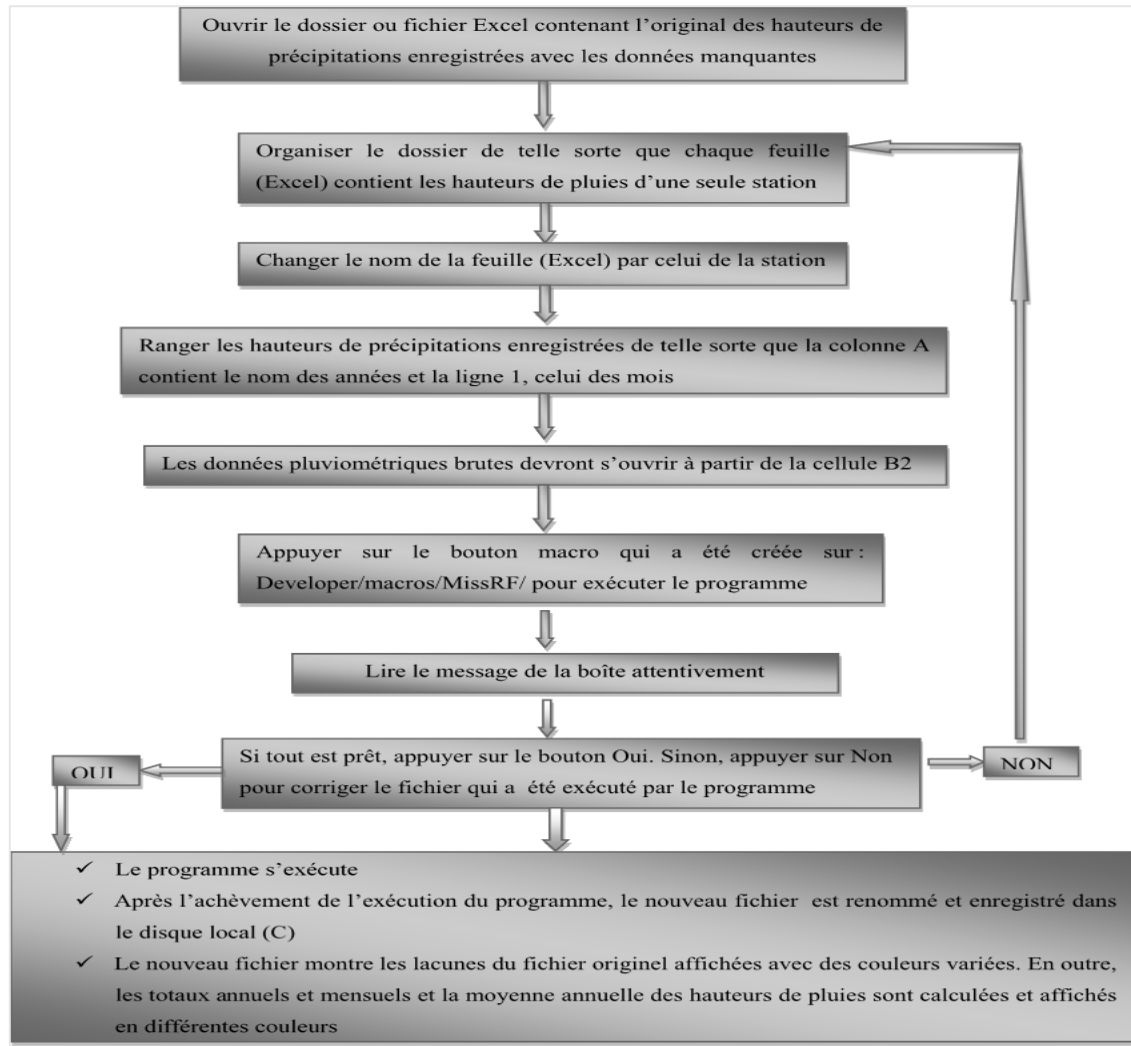


Figure 132. Organigramme du fonctionnement du programme *Missing Rainfall* (MissRF).

Dans le procédé du RN, la chute de pluie P à la station A est estimée à partir de la normale des précipitations mensuelles ou annuelles d'une ou des station (s) de référence (Kédougou et Labé) et de celles des stations riveraines pour la période de données manquantes selon l'équation suivante (Mohanty P.K., Panigrahi D. and Acharya M. (2014)) :

$$P_X = \frac{N_X}{n} \left(\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \frac{P_3}{N_3} + \dots + \frac{P_n}{N_n} \right)$$

où P_X : représente les pluies manquantes à la station x à combler ; N_X la moyenne pluviométrique annuelle à la station x ; P_1, P_2, P_3 et P_n , et N_1, N_2, N_3 et N_n correspondant aux valeurs pluviométriques des stations 1, 2, 3...n respectivement et n : représentant le nombre de stations dont les données pluviométriques sont disponibles.

L'aptitude de la méthode est décidée par la proximité des estimations et les valeurs réelles se trouvant dans une série de temps donnée. Plusieurs statistiques descriptives d'erreurs peuvent être utilisées en tant que critère d'estimation de l'étroitesse des valeurs réelles et calculées tels

que : la moyenne, l'écart type, et les coefficients de variations et de corrélations. Toutes les stations ayant des séries de pluies mensuelles et annuelles lacunaires ou brèves ont été complétées ou étendues à l'aide de cette méthode pour couvrir la période 1921-2016.

Le tableau 40 ci-dessous représente les résultats des statistiques descriptives (moyenne, écart type, coefficient de variation et quartiles) des données pluviométriques des stations du bassin sur lesquelles portera l'analyse de la variabilité pluviométrique.

Tableau 40. Données pluviométriques des stations du bassin du Diarha

Id. Station	Pluie moyenne (1921-2016)	Ecart type (mm)	Coefficient variation	Maximum (mm)	Minimum (mm)	Quartile75% (mm)	Zones Climatiques
Labé	1583	230	0.14	2159	1081	1784	Guinéenne
Mali (Guinée)	1865	286	0.15	2534	1167	2040	Guinéenne
Tougué	1421	203	0.14	1897	873	1563	Sud-soudanienne
Koubia	1645	253	0.15	2223	1024	1798	Guinéenne
Bandafassi	1079	184	0.17	1676	502	1207	Sud-soudanienne
Dakately	1100	276	0.25	2620	589	1193	Sud-soudanienne
Fongolimbi	1144	187	0.16	1534	696	1271	Sud-soudanienne
Kédougou	1241	227	0.18	2160	762	1350	Sud-soudanienne
Laminia	1151	169	0.15	1675	808	1262	Sud-soudanienne
Nepen Diakha	954	182	0.19	1429	549	1065	Nord-soudanienne
Oubadji	870	151	0.17	1623	598	944	Nord-soudanienne
Oussoukala	997	147	0.15	1349	621	1093	Nord-soudanienne
Pita	1563	260	0.17	2375	1102	1725	Guinéenne
Salemata	1123	191	0.17	1654	622	1254	Sud-soudanienne
Koundara	1272	193	0.15	1877	797	1368	Sud-soudanienne
Youkounkoun	1276	194	0.15	1877	802	1375	Sud-soudanienne

IV.3.3. Tests de détection des ruptures sur les pluies annuelles

L'acceptation des hydrologues, en ce qui concerne les totaux annuels des précipitations, est que du point de vue stochastique, ceux-ci ne peuvent plus être considérés comme un processus stationnaire (Musy A., et Meylan P., 1987, Thiaw I., 2017). En effet, il est supposé que dans le contexte de changement climatique, aussi bien l'espérance mathématique que la variance de ce processus aléatoire à l'échelle interannuelle, ne seraient plus indépendantes du temps au temps. C'est la raison qui nous pousse à entreprendre une étude statistique sur les pluies annuelles afin de vérifier leur stationnarité ou non, en utilisant le test de corrélation sur le rang, la statistique de Buishand et l'ellipse de Bois, le test de Pettitt, la méthode Bayésienne de Lee et Heghinian, le test de normalité puis la méthode de segmentation de Hubert utilisés dans de nombreuses études pour analyser la stationnarité des séries hydroclimatiques (Servat E., Paturel J.E, Lubès-Niel H., *et al.*1999). Ces tests sont aussi recommandés par l'Organisation Météorologique

Mondiale (OMM, 2000), pour la détection des changements au sein des séries temporelles. Ils sont programmés dans le logiciel Khronostat (développé au sein du Programme Grands Bassins Tropicaux de l'ORSTOM, ancien nom de l'IRD).

L'approche de Pettitt A.N. (1979) est non paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney (Mann H.B., et Whitney D.R., 1947). L'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total. Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées et testées sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous-échantillons à la même population.

La mise en œuvre de ce test suppose que pour tout instant (t) compris entre 1 et N , les séries chronologiques (x_i) $i=1$ et (t) et $(t+1$ à $N)$, appartiennent à la même population. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée pour l'instant (t) définissant le maximum de la valeur absolue de la variable (UtN) .

Le test de Buishand T.A. (1982,1984) est de nature Bayésienne et fait référence au modèle simple qui suppose un changement de moyenne de la série et s'avère très performant pour détecter une rupture en milieu de série. Il se réfère au même modèle et même hypothèse que l'approche de Lee A.F.S., et Heghinian S.A., (1977). Cependant, en cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test (Khodja H., Lubès-Niel H., Sabatier R., *et al.* 1998 ; Servat E., Paturel J.E, Lubès-Niel H., *et al.* 1999).

Le test de Buishand et le test de Pettitt sont réputés pour leur robustesse, en ce sens qu'ils restent valides même pour des distributions de la variable étudiée qui s'écartent de la normalité (Lubès-Niel H., Masson J. M., Paturel J. E, *et al.* 1998).

Le choix des méthodes retenues repose sur la robustesse de leur fondement et sur les conclusions d'une étude de simulation type Monte-Carlo. Elles permettent de détecter un changement dans la moyenne de la variable traitée dans la série chronologique. À l'exception de l'approche de Pettitt, « elles supposent un non changement de la variance de la série étudiée » (Lubès-Niel, H., Masson, J. M., Paturel, J. E *et al.* 1998).

Les données utilisées dans cette étude sont issues de l'homogénéisation avec la méthode du ratio normal qui nous a permis de combler et d'étendre les séries pluviométriques sur une période de 97 ans (1921-2016) pour l'ensemble des stations du bassin du Diarha. Le choix des stations retenues repose essentiellement sur leur position géographique (répartition spatiale) par rapport au bassin. Les résultats de l'analyse des séries chronologiques par le test de normalité

concluent que les données des séries des stations étudiées suivent une loi normale (avec transformation logarithmique pour Kédougou). Le test de corrélation sur le rang de Kendall (Kendall S.M., et Stuart A., 1943), utilisé pour analyser des tendances dans les séries, met en évidence une tendance à la baisse des précipitations annuelles des stations retenues au seuil de confiance de 99 %.

Les résultats de la détection des ruptures (Tab.41) montrent que les séries de précipitations annuelles ne sont pas stationnaires, comme l'ont montré de nombreuses études (Albergel J., 1986 ; Dacosta H., 1989 ; Lubès-Niel, H., Masson, J. M., Paturel, J. E *et al.* 1998 ; Hubert P., Servat E., Paturel J. E. *et al.* 1998 ; Khodja H., Lubès-Niel H., Sabatier R., *et al.* 1998 ; Manga A.V., 2012 ; Khoualdia W., Djeddar Y. et Hammar Y., 2014 ; Thiaw I., 2017). Elles présentent des ruptures sur six dates différentes comprises entre 1966 (Youkounkoun) et 1980 (Oubadji). L'essentiel des ruptures climatiques est détecté en 1967 (pour 11 des 16 stations du bassin du Diarha). Ces résultats confirment l'importante baisse de la pluviométrie observée en Afrique de l'ouest et centrale par le programme ICCARE de l'IRD (Servat E., Paturel J.E, Lubès-Niel H., *et al.* 1999) et les travaux Bodian A., Dacosta H., et Dezetter A., (2011). Même si l'amplitude du phénomène n'est pas uniforme, toutes les stations ont été touchées (Paturel J.E., Servat E., Delattre M.O., *et al.* 1998).

Tableau 41. Résultats des tests statistiques appliqués aux chroniques de pluies annuelles

Stations	Tests de ruptures		Moyenne avant rupture	Moyenne après rupture	Ecart (mm)	Déficit %
	Pettitt	Lee et Heghinian				
Labé		1969	1653	1511	142	8,6
Mali (Guinée)		1967	1987	1749	238	12
Tougué		1976	1494	1335	159	10,6
Koubia		1967	1748	1552	196	11,2
Bandafassi		1967	1131	1029	102	9
Dakately		1967	1211	995	216	17,9
Fongolimbi		1979	1181	1087	93	7,9
Kédougou		1967	1316	1187	130	9,9
Laminia		1967	1239	1064	175	14,1
Neppen Diakha		1967	995	918	77	7,7
Oubadji		1980	919	784	136	14,7
Oussoukala		1967	1050	950	100	9,6
Pita		1967	1712	1417	295	17,2
Salemata		1967	1216	1074	142	11,6
Koundara		1967	1348	1202	146	10,8
Youkounkoun		1966	1353	1206	147	10,8

Les moyennes pluviométriques annuelles des sous-séries de chaque station, calculées avant et après la rupture montrent une baisse de 77 mm (Neppen Diakha) à 295 mm (Pita) après la

rupture. Cette baisse correspond à des déficits estimés entre 7,7 % à Neppen Diakha et 17,2 % à Pita, soit une moyenne de 12.5%.

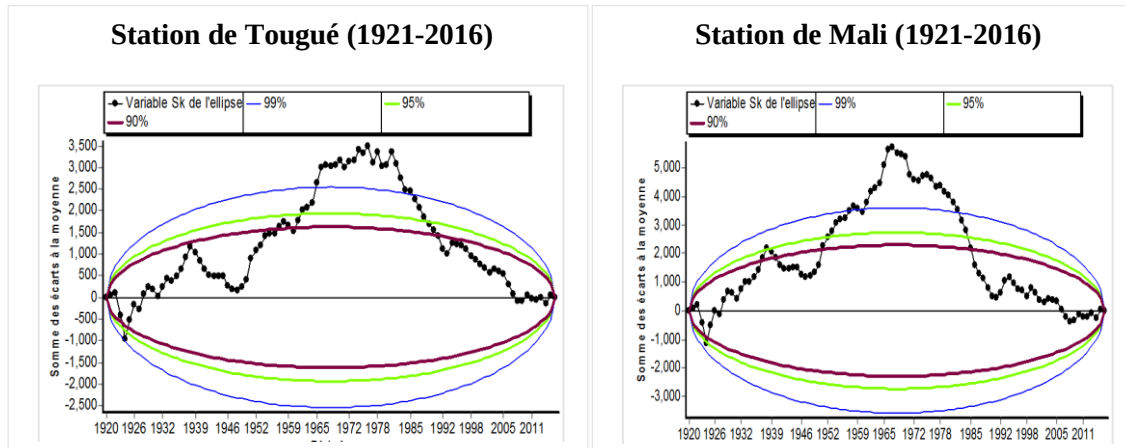
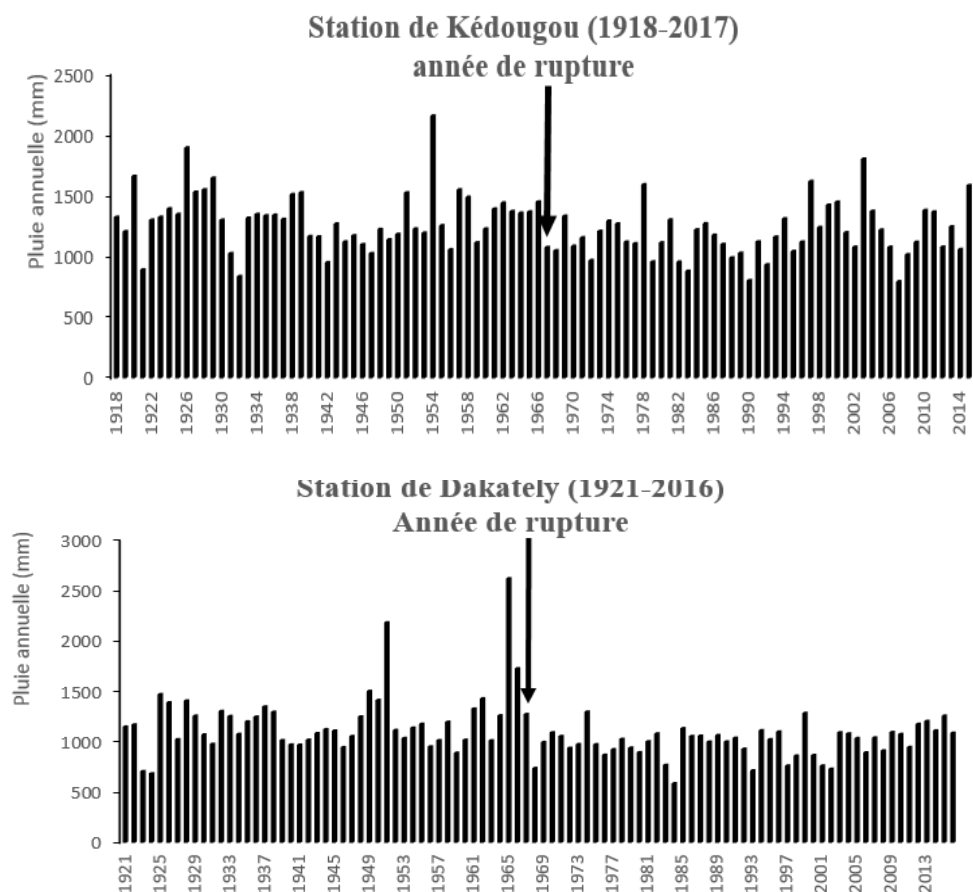


Figure 133. Mise en évidence de la présence de ruptures par l'Ellipse de Bois dans la série des pluies annuelles de Tougué et Mali à tous les seuils de confiance.



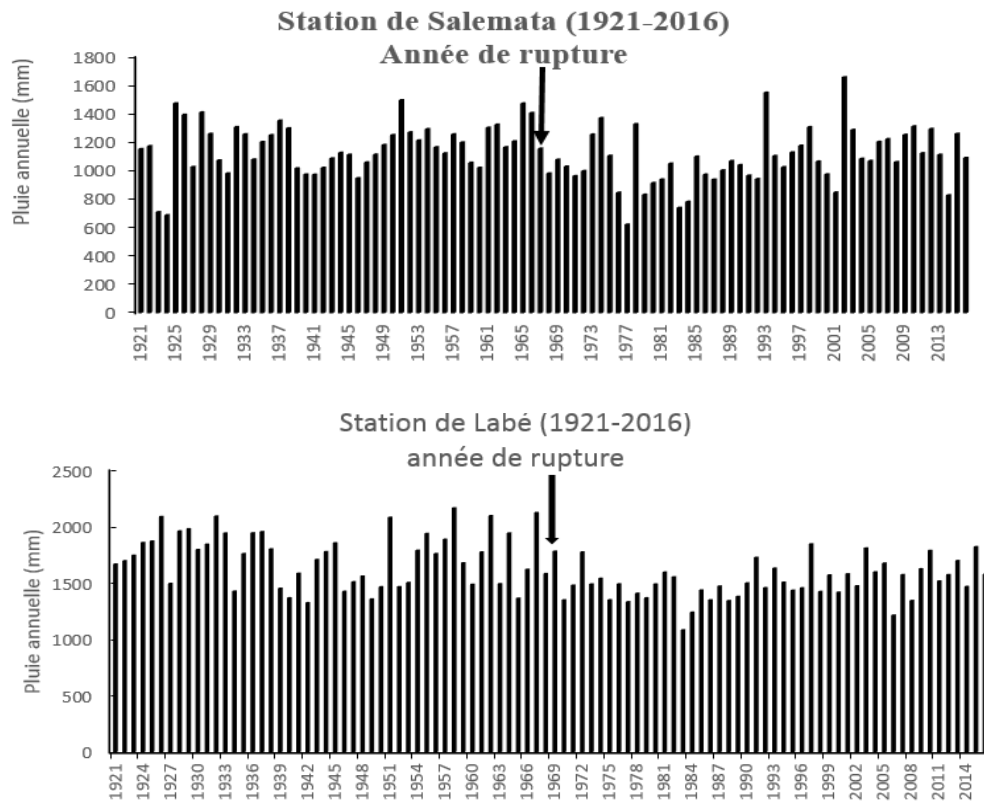


Figure 134. Détection de ruptures sur les pluies annuelles pour quelques stations du bassin du Diarha

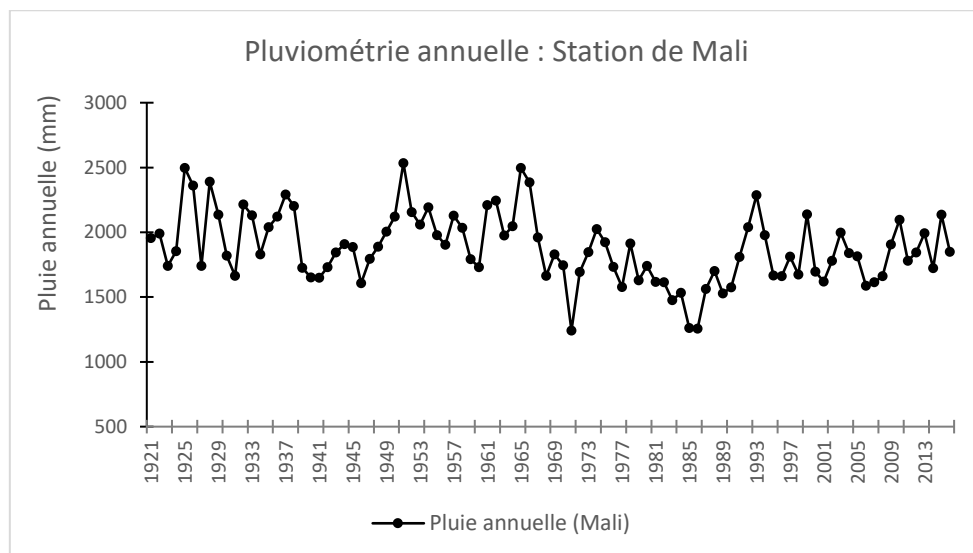
IV.3.4. Analyse de la pluviométrie à l'échelle annuelle et interannuelle

La variabilité spatio-temporelle des totaux annuels est analysée à partir de longues séries chronologiques (1921-2016) issues du fichier pluviométrique homogénéisé par la méthode du ratio normal. L'analyse des longues séries pluviométriques est, selon Mahé G. (1992), « plus apte à détecter les changements des conditions climatiques moyennes ».

La figure 135 montre la variation des pluies annuelles de 1921 à 2016 pour sept stations du bassin du Diarha, en allant du sud (Mali) au nord (Salemata), d'ouest (Youkounkoun) en est (Kédougou). Elle montre une nette différence dans la répartition des apports pluviométriques. En effet, deux gradients pluviométriques sont mis en évidence :

- un gradient nord-sud, avec environ 1120 mm au nord et 1500 mm au sud,
- et un gradient est-ouest, avec environ 1270 mm à l'ouest et 1100 mm à l'est.

Il apparaît donc que l'essentiel des apports pluviométriques proviennent du sud et de l'ouest du bassin, ceux du nord ne représentent qu'environ 75% de ceux du sud. Cette situation s'explique par le fait que le sud et l'ouest du bassin sont les premières zones à être touchées par le flux de mousson qui y séjourne donc plus longtemps. Il s'y ajoute, l'obstacle orographique du Fouta Djallon, qui en s'opposant tel un butoir à la progression de la mousson, provoque des précipitations abondantes, l'une des plus importantes de l'ouest africain, d'où le vocable de « château d'eau d'Afrique de l'ouest » donné à cette région (Sow A.A., 2006)



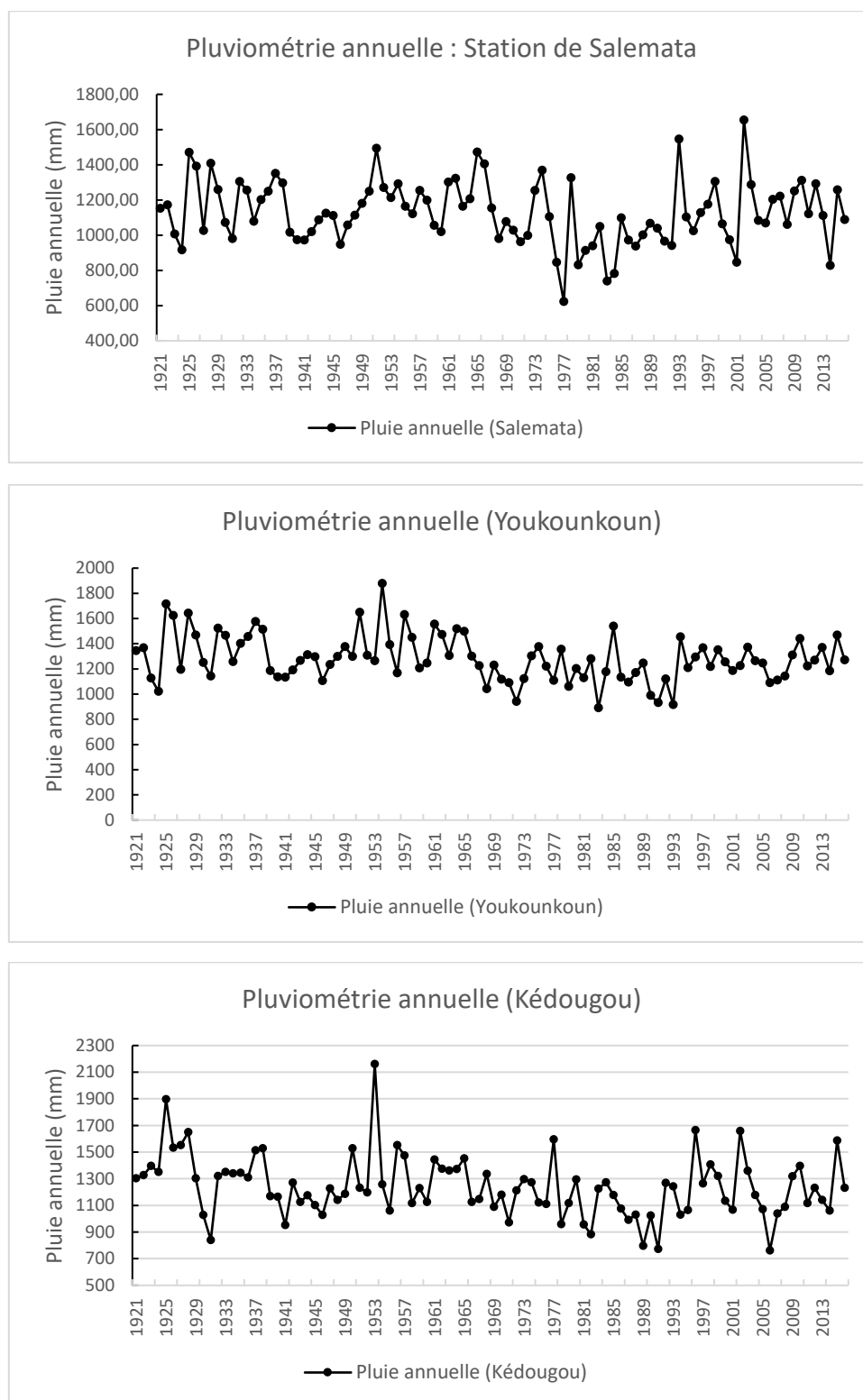


Figure 135. Variations des pluies annuelles de 1921 à 2016 aux principales stations pluviométriques.

IV.3.4.1. Evolution des normales pluviométriques

Les normales pluviométriques sont des moyennes glissantes se succédant les unes aux autres tous les trente ans (1921-50, 1931-1960, 1941-1970, 1951-1980, etc.). Dans le tableau 42 ci-dessous est consigné les normales pluviométriques allant de 1921-50 à 1981-2010. Ce tableau montre que ce sont les normales 1931-60, 1941-70 et 1951-80 qui ont été les plus humides dans toutes les stations climatiques du bassin. La sécheresse a plus affecté les trois dernières normales (1961-90, 1971-2000 et 1981-2010), avec cependant une nette amélioration pendant la normale 1981-2010 durant laquelle la hausse des précipitations est plus sensible au sud et à l'ouest du bassin.

Tableau 42. Moyennes pluviométriques annuelles (mm) des normales de 1921-50 à 1981-2010.

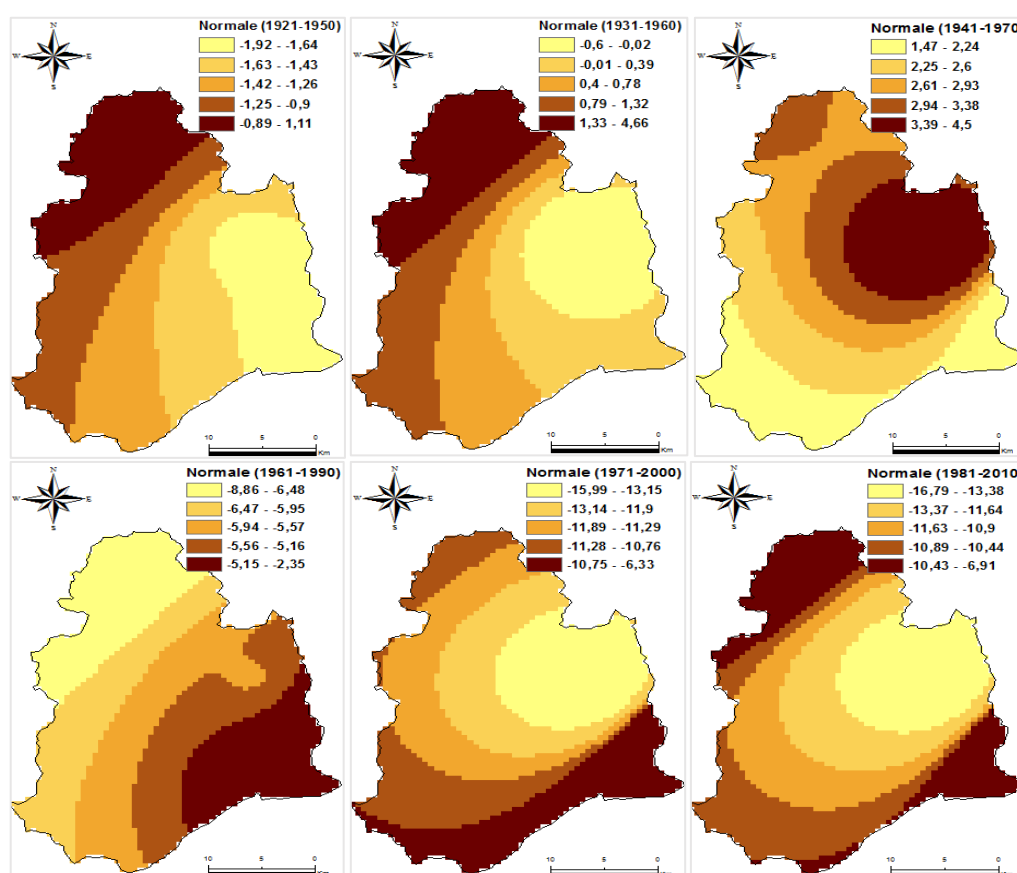
Station	Moy (1921-1950)	Moy (1931-1960)	Moy (1941-1970)	Moy (1951-1980)	Moy (1961-1990)	Moy (1971-2000)	Moy (1981-2010)	Zones Climatiques
Labé	1576	1688	1684	1660	1541	1480	1511	Guinéenne
Mali (Guinée)	1919	1960	1983	1946	1767	1707	1727	Guinéenne
Tougué	1436	1467	1500	1510	1423	1370	1403	Sud-soudanienne
Koubia	1683	1719	1739	1700	1569	1524	1552	Guinéenne
Koundara	1306	1340	1330	1307	1222	1182	1200	Sud-soudanienne
Youkounkoun	1313	1345	1332	1307	1222	1184	1205	Sud-soudanienne
Pita	1651	1736	1696	1592	1422	1386	1456	Guinéenne
Bandafassi	1092	1116	1129	1115	1043	1001	1028	Sud-soudanienne
Dakately	1151	1164	1224	1171	1106	980	974	Sud-soudanienne
Fongolimbi	1144	1169	1193	1212	1126	1097	1082	Sud-soudanienne
Kédougou	1299	1287	1296	1282	1218	1145	1181	Sud-soudanienne
Laminia	1207	1252	1231	1199	1090	1056	1059	Sud-soudanienne
Neppen Diakha	961	981	993	981	964	932	925	Nord-soudanienne
Oubadji	893	926	911	945	864	838	783	Nord-soudanienne
Oussounkala	1021	1043	1024	1034	964	954	937	Nord-soudanienne
Salemata	1185	1229	1209	1166	1057	1038	1091	Sud-soudanienne

Le tableau 43 évalue les déficits entre les normales par rapport à la normale de référence 1951-80 en valeur relative. Le choix de la normale 1951-80 comme normale de référence se fonde sur le plus faible écart qu'elle présente par rapport à l'ensemble de la série observée comparativement aux autres normales (Dacosta H., Konaté Y.K., et Malou R., 2002). À quelques exceptions près, les écarts sont positifs pour les normales 1931-1960 et 1941-1970. Dans toutes les stations étudiées, les trois dernières normales (1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010) sont déficitaires par rapport à la normale 1951-1980, mais, les écarts sont plus prononcés au cours des normales 1961-1990 et 1971-2000.

Tableau 43. Ecart par rapport à la normale de référence

Station	Normale (1921-1950)	Normale (1931-1960)	Normale (1941-1970)	Normale (1961-1990)	Normale (1971-2000)	Normale (1981-2010)
Labé	-5,1	1,7	1,4	-7,2	-10,8	-9,0
Mali (Guinée)	-1,4	0,7	1,9	-9,2	-12,3	-11,3
Tougué	-4,9	-2,8	-0,7	-5,8	-9,3	-7,1
Koubia	-1,0	1,1	2,3	-7,7	-10,4	-8,7
Koundara	-0,1	2,5	1,8	-6,5	-9,6	-8,2
Youkounkoun	0,5	2,9	1,9	-6,5	-9,4	-7,8
Pita	3,7	9,0	6,5	-10,7	-12,9	-8,5
Bandafassi	-2,1	0,1	1,3	-6,5	-10,2	-7,8
Dakately	-1,7	-0,6	4,5	-5,6	-16,3	-16,8
Fongolimbi	-5,6	-3,5	-1,6	-7,1	-9,5	-10,7
Kédougou	1,3	0,4	1,1	-5,0	-10,7	-7,9
Laminia	0,7	4,4	2,7	-9,1	-11,9	-11,7
Neppen Diakha	-2,0	0,0	1,2	-1,7	-5,0	-5,7
Oubadji	-5,5	-2,0	-3,6	-8,6	-11,3	-17,1
Oussoukala	-1,3	0,9	-1,0	-6,8	-7,7	-9,4
Salemata	1,6	5,4	3,7	-9,3	-11,0	-6,4

Il nous est apparu intéressant de spatialiser (Fig.136) les résultats du tableau 43 pour suivre l'évolution des déficits à l'échelle du bassin du Diarha. L'examen de cette figure montre que le sud et le nord-ouest du bassin présentent les plus faibles déficits. La crise climatique (normales 1971-2000 et 1981-2010) a surtout affecté le centre et l'est du bassin du Diarha.

**Figure 136.** Répartition spatiale des écarts par rapport à la normale de référence

IV.3.4.2. Evolution des pluies décennales

La variation temporelle des pluies moyennes annuelles est plus perceptible à l'échelle décennale car, comparée à l'échelle trentenaire, elle présente moins de biais statistiques. Leur analyse par l'intermédiaire du tableau 44 montre que les deux dernières décennies (1991-2000 et 2001-2010) sont marquées par un redressement des hauteurs pluviométriques annuelles comparées aux deux précédentes (1971-80 et 1981-90). Ces décades comportent des années à pluviométrie excédentaire à très excédentaire comme 1994, 1999, 2003 et 2010 qui ont contribué à élever leur moyenne décennale. En outre, bien que différentes des conditions pluviométriques avant la grande sécheresse des années 1968-1993, ces décennies montrent bien un retour au-dessus ou près de la moyenne de long terme 1921-2016 (Fig.137). C'est en raison des biais statistiques liés aux normales et la forte baisse de la pluviométrie au cours de la décennie 1981-1990 que cette tendance à la hausse des pluies est atténuée. Ces résultats confirment les travaux de Sambou S., Dacosta H., et Paturel J.-E. (2018) dans le bassin versant du fleuve Kayanga/Geba et de Descroix L., Diongue Niang A., Panthou G. *et al.* (2015) en Sénégal et dans le bassin du Niger moyen.

Tableau 44. Moyennes pluviométriques décennales (mm).

Station	Moy (1921- 1930)	Moy (1931- 1940)	Moy (1941- 1950)	Moy (1951- 1960)	Moy (1961- 1970)	Moy (1971- 1980)	Moy (1981- 1990)	Moy (1991- 2000)	Moy (2001- 2010)
Labé	1448	1738	1543	1782	1725	1473	1424	1543	1565
Mali (Guinée)	1926	1987	1843	2050	2056	1732	1512	1876	1792
Tougué	1441	1487	1380	1535	1585	1411	1272	1342	1354
Koubia	1689	1743	1617	1798	1803	1498	1407	1668	1581
Koundara	1316	1357	1244	1419	1326	1177	1162	1207	1231
Youkounkoun	1323	1365	1251	1419	1326	1177	1164	1211	1238
Pita	1610	1742	1601	1865	1621	1289	1356	1514	1497
Bandafassi	1096	1131	1050	1167	1170	1008	950	1044	1090
Dakately	1134	1170	1173	1173	1349	991	977	971	974
Fongolimbi	1148	1184	1099	1223	1258	1156	965	1170	1113
Kédougou	1390	1229	1203	1354	1332	1161	1159	1116	1268
Laminia	1174	1270	1178	1308	1207	1082	980	1104	1092
Neppen Diakha	964	995	923	1027	1029	887	914	996	865
Oubadji	869	940	871	968	893	974	725	816	808
Oussoukalla	1025	1057	981	1091	1000	1011	880	972	959
Salemata	1134	1170	1086	1208	1211	1022	962	1123	1198

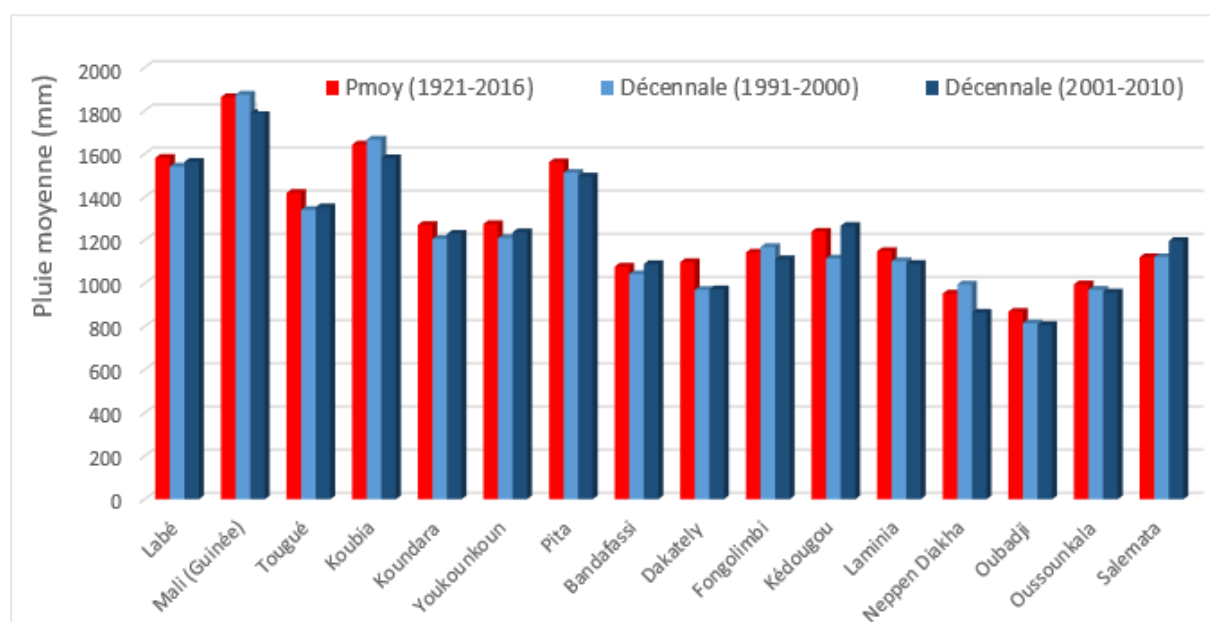


Figure 137. Moyennes des décades 1991-2000 et 2001-2010 par rapport à la moyenne de long terme 1921-2016

Les écarts par rapport à la décennale de référence 1961-70, choisie sur les mêmes principes que les normales pluviométriques, ont été calculés et les résultats consignés dans le tableau 45 puis spatialisés à la figure 138. Ce tableau confirme les observations faites à partir du tableau 43.

Tableau 45. Ecart par rapport à la décennale de référence (1961-1970)

Station	Moy (1921-1930)	Moy (1931-1940)	Moy (1941-1950)	Moy (1951-1960)	Moy (1971-1980)	Moy (1981-1990)	Moy (1991-2000)	Moy (2001-2010)
Labé	-16,06	0,8	-10,6	3,3	-14,6	-17,4	-10,6	-9,3
Mali (Guinée)	-6,32	-3,4	-10,4	-0,3	-15,8	-26,5	-8,8	-12,8
Tougué	-9,09	-6,2	-12,9	-3,2	-11,0	-19,7	-15,3	-14,6
Koubia	-6,32	-3,3	-10,3	-0,3	-16,9	-22,0	-7,5	-12,3
Koundara	-0,75	2,3	-6,2	7,0	-11,2	-12,4	-9,0	-7,2
Youkounkoun	-0,23	2,9	-5,7	7,0	-11,2	-12,2	-8,7	-6,6
Pita	-0,68	7,5	-1,2	15,1	-20,5	-16,3	-6,6	-7,6
Bandafassi	-6,32	-3,3	-10,3	-0,3	-13,8	-18,8	-10,8	-6,8
Dakatelly	-15,94	-13,3	-13,0	-13,0	-26,5	-27,6	-28,0	-27,8
Fongolimbi	-8,74	-5,9	-12,6	-2,8	-8,1	-23,3	-7,0	-11,5
Kédougou	4,35	-7,7	-9,7	1,7	-12,8	-13,0	-16,2	-4,8
Laminia	-2,73	5,2	-2,4	8,4	-10,4	-18,8	-8,5	-9,5
Neppen Diakha	-6,32	-3,3	-10,3	-0,2	-13,8	-11,2	-3,2	-15,9
Oubadji	-2,69	5,3	-2,5	8,4	9,1	-18,8	-8,6	-9,5
Oussoukalla	2,50	5,7	-1,9	9,1	1,1	-12,0	-2,8	-4,1
Salemata	-6,36	-3,4	-10,3	-0,2	-15,6	-20,6	-7,3	-1,1

L'analyse des cartes de répartition spatiale des écarts par rapport à la décennale 1961-1970 montre que c'est surtout les zones moins pluvieuses – le centre et l'est du bassin qui ont subi les déficits les plus importants – comparées aux zones pluvieuses (nord-ouest et sud-ouest du bassin) où on note une faible baisse de la pluviométrie.

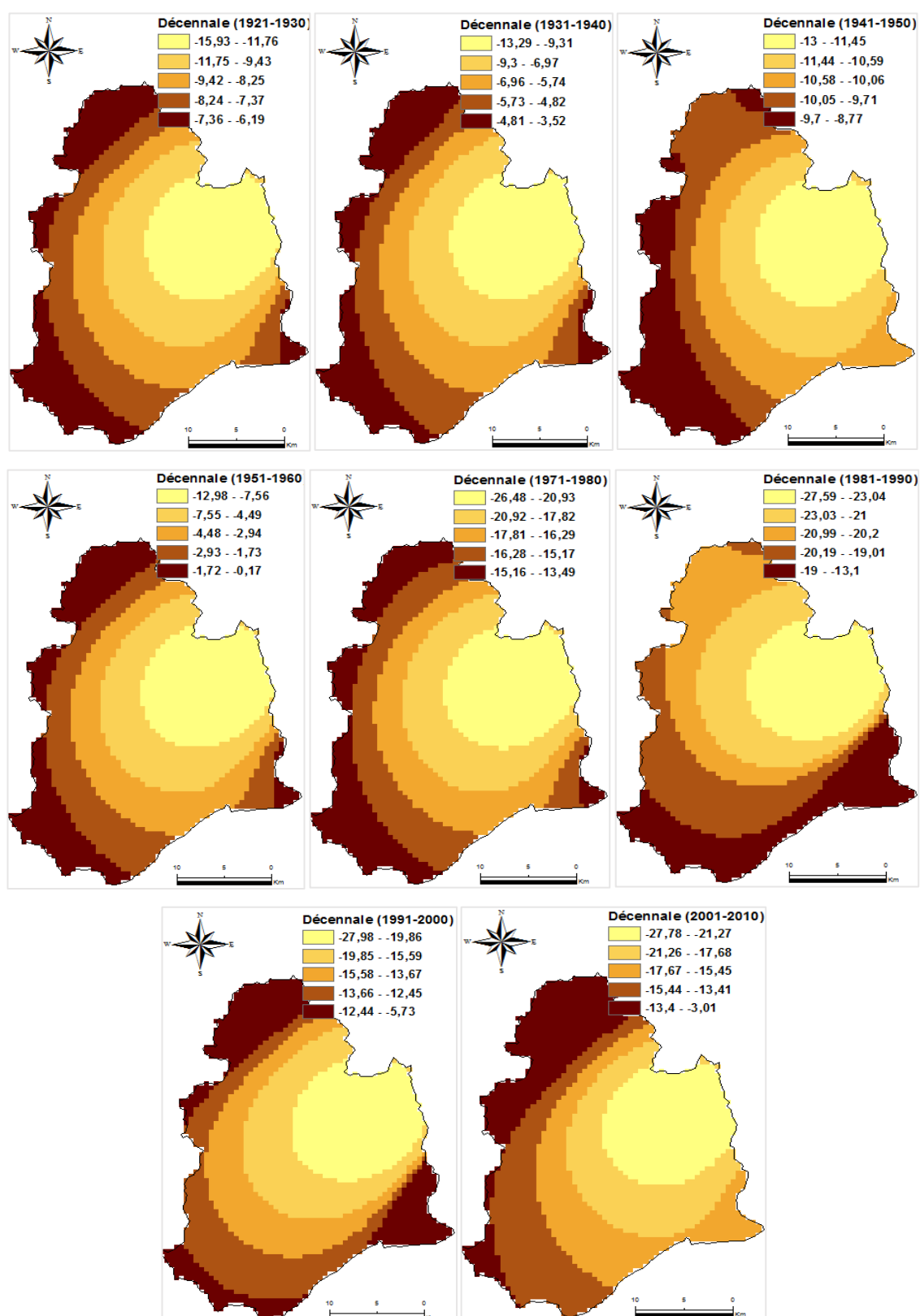


Figure 138. Répartition spatiale des écarts par rapport à la décennale de référence

En somme, l'analyse des pluies trentenaires et des moyennes pluviométriques décennales mettent en exergue :

- une période excédentaire entre 1950 et 1967, caractérisée par une décennie très humide (1951-1960) dans toutes les stations étudiées ;
- une période déficitaire entre 1968 et 1993, avec une baisse maximale enregistrée au cours de la décennie 1981-1990.
- les décennies avant 1950 (1921-1930, 1931-1940) et depuis le milieu des années 90 se ressemblent, entourant la moyenne avec de fortes variabilités interannuelles. Cette dernière période (1994-2016) marque un retour au-dessus ou très proche de la moyenne de long terme 1921-2016 (Tab.46).

Tableau 46. Variations des pluies moyennes interannuelles des stations du Diarha

Id. Station	(1921-2016)	1921-1949	1950-1967	1968-1993	1994-2016	% Reprise des pluies
Labé	<u>1583</u>	1581	1768	1480	<u>1560</u>	99
Mali	<u>1865</u>	1912	2108	1685	<u>1819</u>	98
Tougué	<u>1421</u>	1431	1578	1344	<u>1377</u>	97
Koubia	<u>1645</u>	1677	1849	1472	<u>1639</u>	100
Bandafassi	<u>1079</u>	1088	1200	967	<u>1097</u>	102
Dakately	<u>1100</u>	1142	1322	969	<u>1025</u>	93
Fongolimbi	<u>1144</u>	1140	1257	1067	<u>1147</u>	100
Kédougou	<u>1241</u>	1291	1345	1126	<u>1225</u>	99
Laminia	<u>1151</u>	1202	1298	1029	<u>1106</u>	96
Nepen Diakha	<u>954</u>	957	1055	892	<u>942</u>	99
Oubadji	<u>870</u>	890	960	828	<u>818</u>	94
Oussoukala	<u>997</u>	1018	1082	930	<u>983</u>	99
Pita	<u>1563</u>	1649	1812	1328	<u>1517</u>	97
Salemata	<u>1123</u>	1126	1242	1015	<u>1146</u>	102
Koundara	<u>1272</u>	1306	1409	1144	<u>1266</u>	100
Youkounkoun	<u>1276</u>	1313	1409	1145	<u>1272</u>	100

IV.3.5. Indices Standardisés des Précipitations annuelles

En vue d'apprécier l'évolution de la pluviométrie au cours des différentes années, la méthode de l'indice pluviométrique a été appliquée. Ce dernier est connu sous appellation : indice de Nicholson et/ou l'Indice Standardisé des Précipitations ou Standardized Precipitation Index (SPI en anglais). Cette méthode a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et les périodes déficitaires. Ainsi, pour chacun des postes pluviométriques retenus, un indice de la pluie interannuelle a été déterminé. Il se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation suivante (Servat E., Paturel J.E, Lubès-Niel H., *et al*, 1999) :

$$SPI = \frac{Xi - \bar{X}}{E.T} \quad (29)$$

Avec : Xi : la valeur de la pluviométrie annuelle de l'année i ; $\bar{X}$: pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence, et $E.T$: écart-type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence.

Nous avons utilisé l'indice pluviométrique pour approfondir l'analyse de la variation annuelle des précipitations dans les régimes pluviométriques du bassin, car en plus de son efficacité dans la mise en évidence des excédents et des déficits pluviométriques, cet indice permet de mesurer « l'ampleur de la sécheresse (ou de l'humidité) pour chacune des années de la série chronologique » (Wu H., Hayes M.J., Wilhite D.A et *al*. 2005). Les indices pluviométriques mettent en évidence la pluviosité annuelle d'une série chronologique donnée. La moyenne interannuelle d'une série correspond à l'indice nul (0) selon l'indice. Les valeurs supérieures à l'unité sont des années excédentaires et celles inférieures, des années déficitaires. Ainsi, l'évaluation des indices SPI met en évidence l'évolution dans l'espace de cette variable centrée réduite, tout en soulignant les excédents et les déficits pluviométriques. On remarque sur la période 1968-1990, un quasi absence d'indices positifs caractéristiques d'années excédentaires : c'est le cas par exemple aux stations de Kédougou, Mali, Dakately, Bandafassi et Laminia ; tandis qu'à partir du milieu des années 90, un redressement de la pluviométrie est observé dans toutes les stations de l'étude (Fig.139).

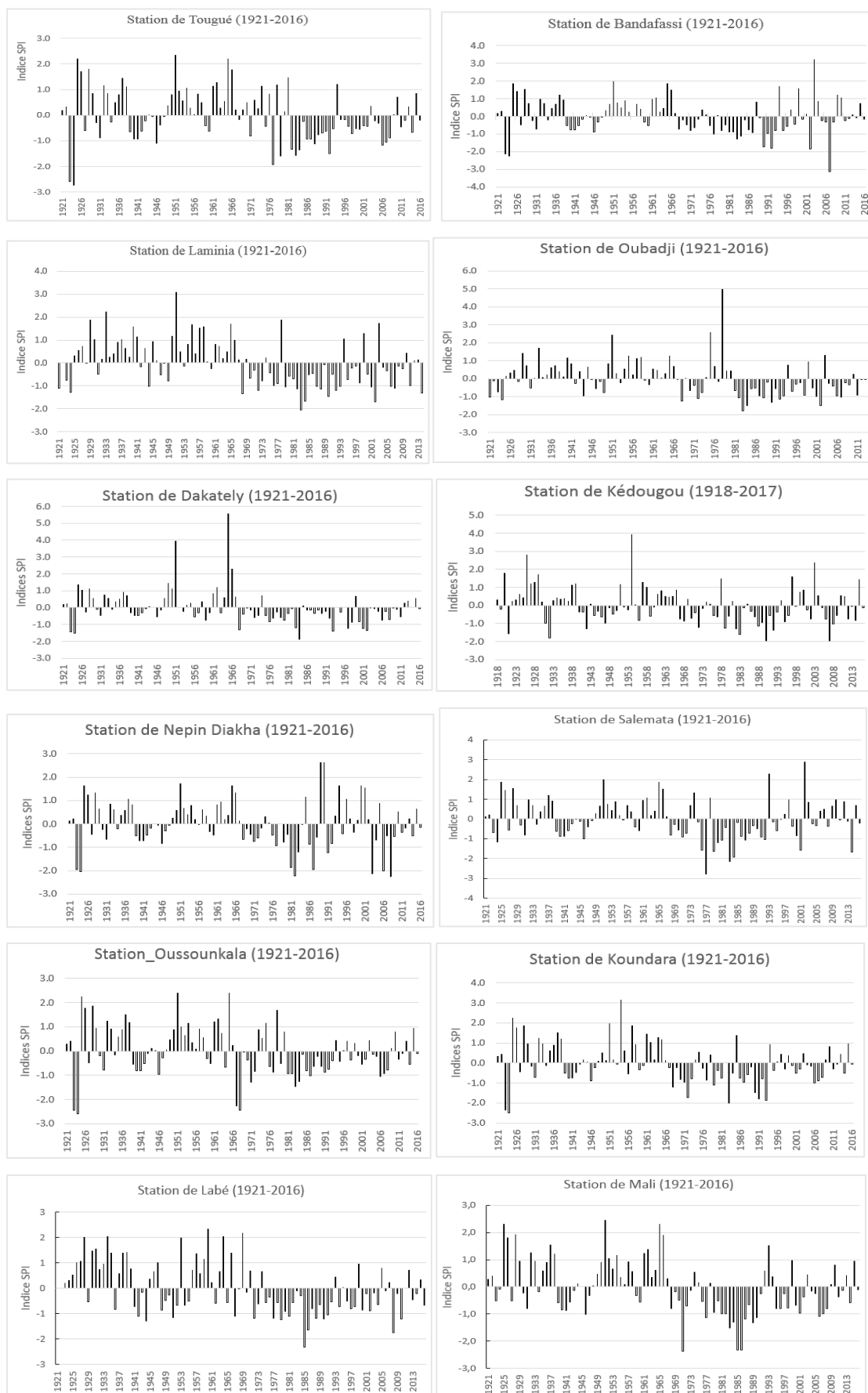


Figure 139. Indices standardisés des précipitations annuelles de quelques stations du bassin du Diarha.

Les indices SPI sont classés en 6 principales gammes de valeurs dont chacune représente l'effet du phénomène climatique (magnitude de la sécheresse). Ces gammes de valeurs et leur interprétation (Tab.47) sont obtenues à partir de l'équation suivante :

$$A_i = \left(\frac{ni}{N} \right) * 100 \quad (30)$$

avec A_i : le pourcentage des années concernées par la classe i ; ni : le nombre d'année de la classe i , et N : le nombre total d'années sur la période d'étude.

Tableau 47. Proportions (en %) d'années sèches et humides par station.

Classes SPI	SPI < -2	-2 < SPI < -1	-1 < SPI < 0	0 < SPI < 1	1 < SPI < 2	SPI > 2
Interprétation	Sécheresse extrême	Sécheresse forte	Sécheresse modérée	Humidité modérée	Humidité forte	Humidité extrême
Labé (1921-2016)	3%	2%	46%	34%	15%	0
Mali (1921-2016)	5%	6%	43%	31%	11%	3%
Tougué (1921-2016)	2%	10%	41%	30%	14%	3%
Koubia (1921-2016)	3%	10%	42%	31%	9%	4%
Koundara (1921-2016)	2%	7%	46%	30%	13%	2%
Youkounkoun (1921-2016)	3%	6%	46%	31%	11%	2%
Pita (1921-2016)	0	16%	38%	35%	7%	4%
Bandafassi (1921-2016)	3%	5%	47%	32%	13%	0
Dakately (1921-2016)	0	9%	48%	33%	6%	3%
Fongolimbi (1921-2016)	3%	14%	36%	32%	14%	1%
Kédougou (1918-2017)	0	12%	42%	30%	12%	3%
Laminia (1921-2016)	1%	20%	31%	30%	16%	2%
Nepin Diakha (1921-2016)	4%	7%	41%	33%	13%	2%
Oubadji (1921-2016)	0	14%	40%	35%	7%	3%
Oussoukalla (1921-2016)	4%	5%	45%	32%	11%	2%
Salemata (1921-2016)	4%	6%	44%	33%	10%	2%
Moyenne SPI (bassin du Diarha)	2%	9%	44%	32%	11%	2%

L'interprétation des données pluviométriques issues du calcul des indices SPI (Tab.47), montre que le bassin du Diarha a connu des années de sécheresse extrême. Il s'agit par exemple des années 1977 à Salémata, 1983 à Tougué, et 1990 ; 1992 et 2007 à Kédougou. L'ensemble de ces déficits pluviométriques se situe sur la période 1968-2016. Cependant, il a enregistré quelques années d'extrêmes humidités, se situant majoritairement sur la période 1921-1967 : il s'agit par exemple des années 1929 et 1954 à Kédougou, et 1933 et 1951 à Tougué et Dakately (Fig.139).

En considérant toutes les stations et toute la période d'observation (1921-2016), les conditions sèches l'emportent dans 55% des cas. Une sécheresse modérée s'est manifestée dans 44% des cas et une humidité modérée dans 32% des cas (Tab.47). En conséquence, la crise climatique qui a frappé le bassin du Diarha sur la période 1968-1993 s'est surtout manifestée par une augmentation de la fréquence des sécheresses modérées et non par des sécheresses extrêmes.

IV.3.6. Répartition spatiale des pluies annuelles

La pluviométrie moyenne annuelle du bassin du Diarha diminue, d'une part, d'amont (sud) en aval (nord) et d'ouest en est ; et d'autre part, depuis 1968 marquant le début de la grande sécheresse des années 1968-1993. Or, le milieu des années 90 marque le début d'une nouvelle séquence humide très similaire des conditions pluviométriques avant 1950. Les cartes de la figure 140 montrent les variations spatiales de la pluviométrie moyenne annuelle de 1921 à 2016 ; 1921-1949 ; 1950-1967 ; 1968-1993 et 1994-2016. Globalement le bassin du Diarha reçoit en moyenne une pluviométrie qui varie de 1161 à 972mm. Sur la période hyper humide (1950-1967), il reçoit entre 1322 et 1083mm. Par contre, la sécheresse de 1968-1993 est marquée par une translation des isohyètes vers le nord avec l'isohyète 937 mm à l'est, alors que celle de 1031 mm borde l'ouest et le sud du bassin. La période 1994-2016 montre un retour au-dessus (secteurs nord et sud-ouest du bassin) ou près (à l'est du bassin) de la moyenne de long terme.

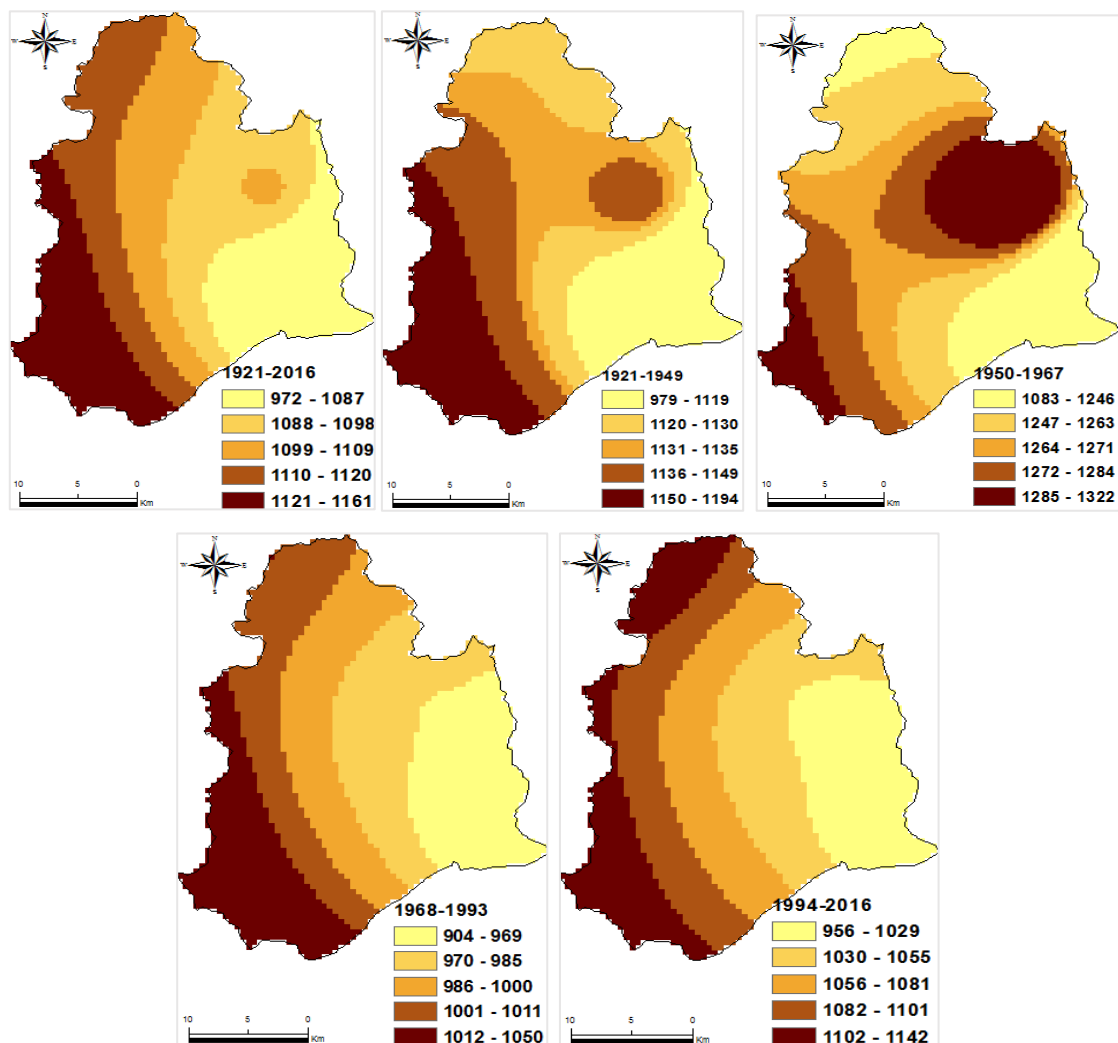
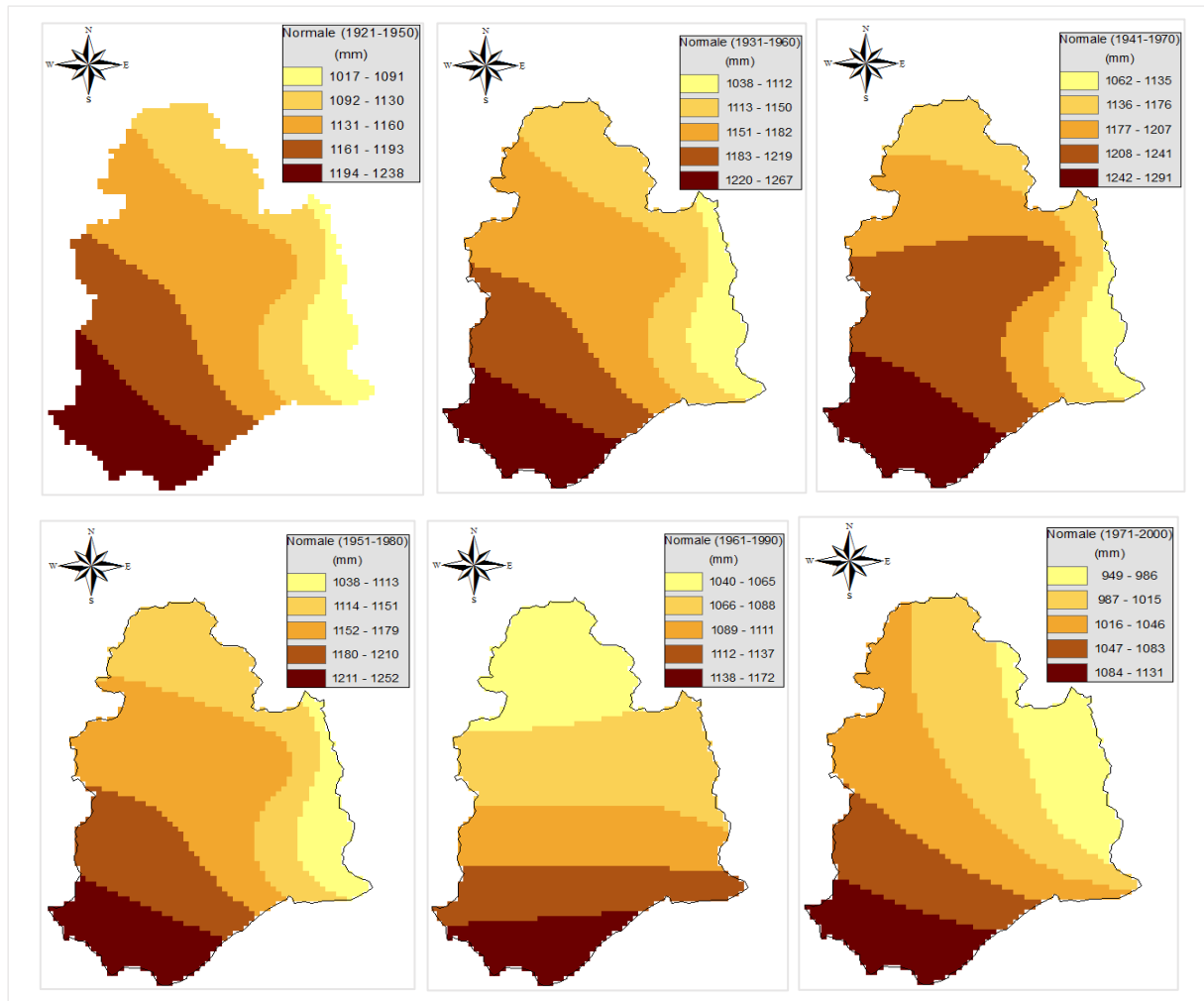


Figure 140. Cartes des variations spatiales de la pluviométrie annuelle sur le bassin du Diarha.

L'observation des cartes de variations spatiales des pluies trentenaires (Fig.141) montre que les normales (1931-1960 et 1941-1970) ont été les plus humides dans le bassin du Diarha. La première avait des isohyètes qui varient entre 1038 mm à l'est et 1267 mm au sud-ouest et la seconde, des isohyètes qui varient de 1062 à 1291mm. Au cours de cette période, la diminution des pluies annuelles est marquée par la migration des isohyètes vers le nord et l'est du bassin. Cependant, celles de 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010 sont marquées par une translation des isohyètes dans le sens inverse. La normale 1971-2000 a été la plus déficitaire de toutes ces normales climatiques. Elle est marquée par une descente des isohyètes en direction du sud et de l'ouest, avec des moyennes qui varient de 949 à 1131mm.



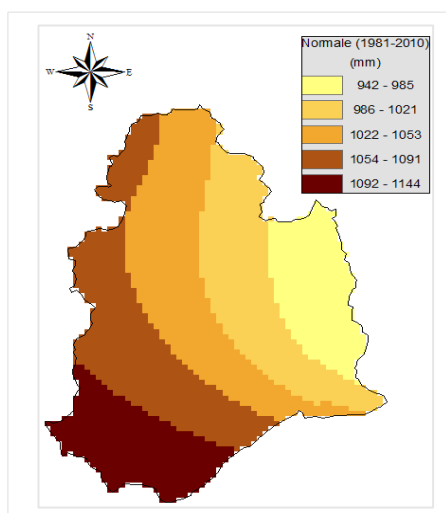
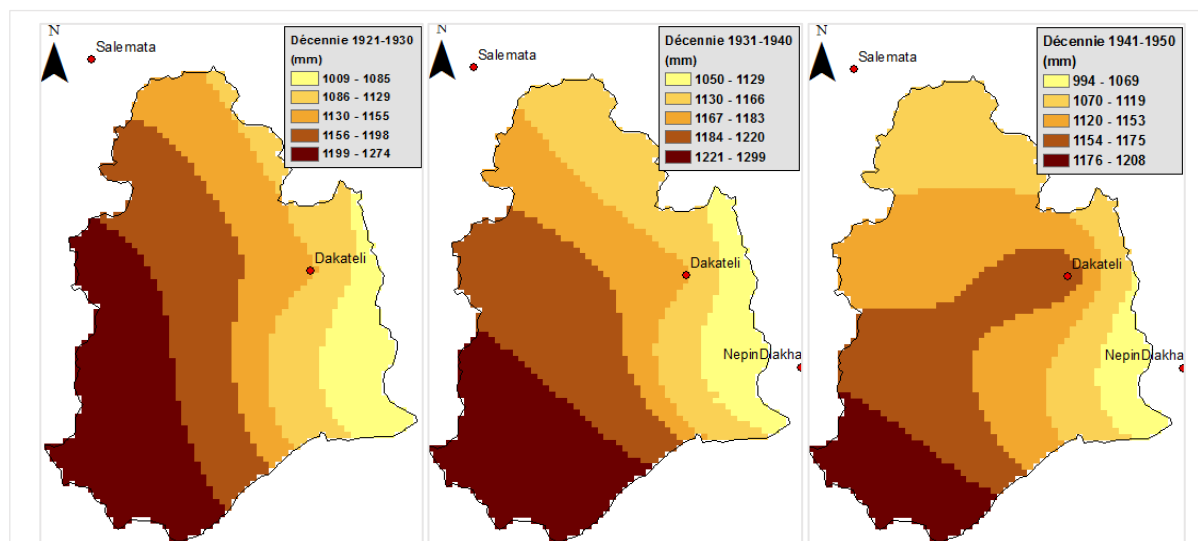


Figure 141. Bassin du Diarha-Cartes de spatialisation des pluies trentenaires.

L'observation des cartes des pluies décennales (Fig.142) donne un aperçu plus détaillé de la baisse de la pluviométrie. Celle-ci a progressivement baissé dans le temps et dans l'espace avec une migration des isohyètes en direction de l'ouest et du sud. La décennie 1961-1970 est la plus humide avec des moyennes annuelles comprises entre 1227 et 1349mm. À partir de cette décennie, les isohyètes redescendent à partir des décennies (1971-1980 et 1981-1990) en direction du sud-ouest. Ces périodes sèches peuvent être interprétées comme les manifestations de la grande sécheresse qui a frappé l'Afrique de l'ouest à partir de la fin des années 60 et au milieu des années 90 (Paturel J.E., Servat E., Delattre M.O., *et al.*1998 ; Lubès-Niel H., Masson J. M., Paturel J. E. *et al.*1998 ; Servat E., Paturel J.E, Lubès-Niel H., *et al.*, 1999 ; Dacosta H., Konaté Y.K., et Malou R., 2002). Les deux dernières décennies (1991-2000 et 2001-2010) sont marquées par un redressement des hauteurs pluviométriques annuelles. Cette nouvelle tendance de reprise des pluies, amorcée depuis la décennie 1991-2000, s'est accentuée au cours de la décennie 2001-2010.



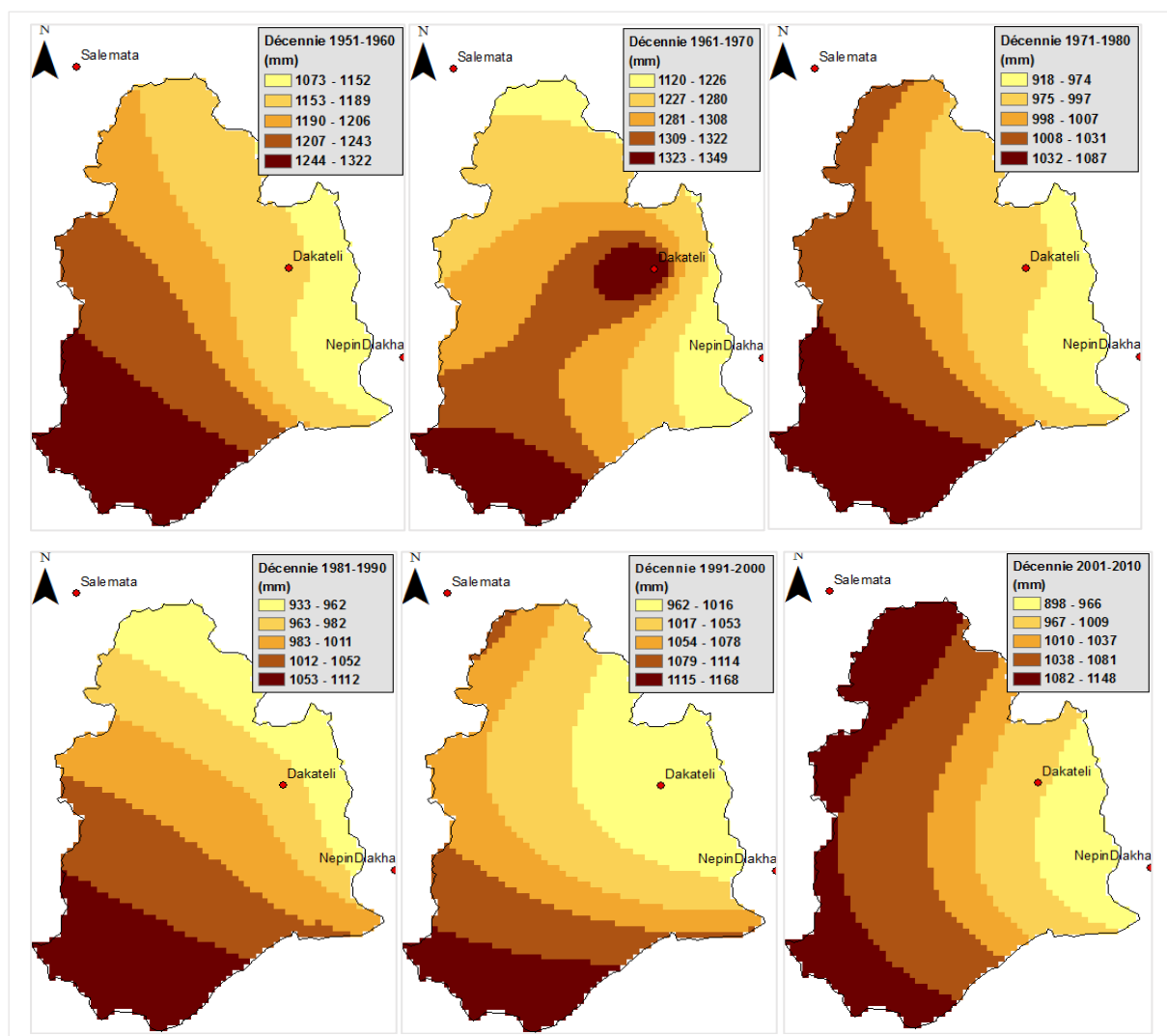


Figure 142. Bassin du Diarha-Cartes de spatialisation des pluies moyennes décennales

Dans l'ensemble, l'évolution spatiotemporelle des pluies moyennes annuelles du bassin montre une baisse aussi bien dans « les minima » que dans « les maxima ». Cette baisse s'est traduite par une translation des isohyètes vers l'ouest et le sud dans les zones « moins » pluvieuses situées au nord et à l'est ; tandis que celles-ci se resserrent dans les zones à « fortes » précipitations au sud et à l'ouest du bassin du Diarha. Il apparaît donc clairement que la sécheresse a fortement marqué le bassin du Diarha, mais sa sévérité et son ampleur sont plus prononcés au cours des décennies 1971-80 et 1981-90. Les deux dernières décennies (1991-2000 et 2001-2010) sont marquées par un redressement des hauteurs pluviométriques annuelles comparées aux deux précédentes. Cette forte variabilité des lames d'eau reçues par le bassin aura sans doute des conséquences sur ses disponibilités en eau.

IV.3.7. Calcul de la pluie moyenne annuelle surfacique dans les sous bassins

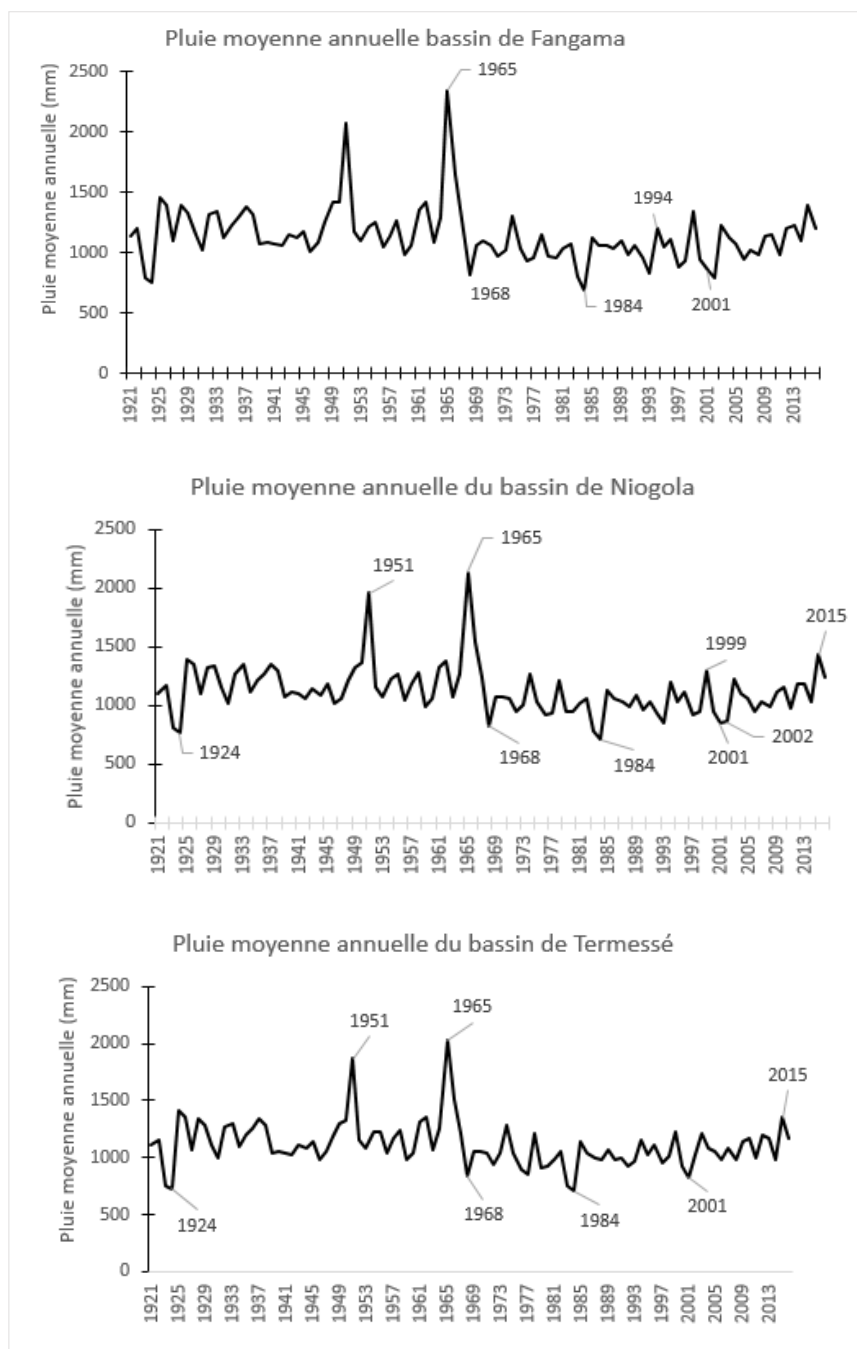
Le passage des mesures pluviométriques ponctuelles à une estimation spatiale est indispensable en hydrologie afin de pouvoir estimer la quantité d'eau précipitée sur un bassin versant, et la comparer aux volumes d'eau écoulés sur le même bassin versant.

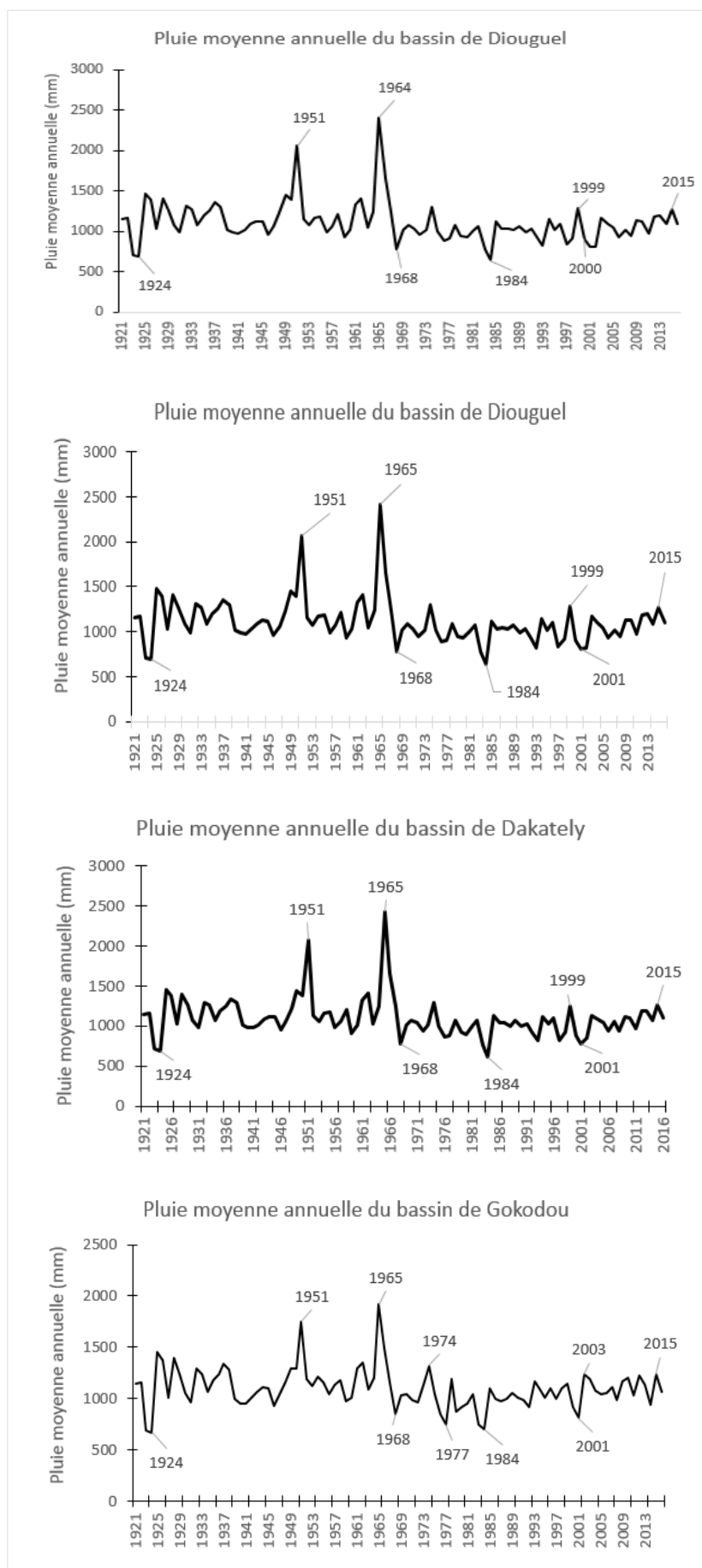
Sur la base du fichier pluviométrique opérationnel, les lames d'eau précipitées annuelles du Diarha et de ses sous bassins ont été calculées par la méthode du krigeage. C'est « une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui estime la valeur d'une variable en des points non observés par une combinaison linéaire sans biais et une variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins » Baillargeon S. (2005). L'estimation des erreurs qu'il produit est plus fiable que celles produites par les autres méthodes d'interpolation spatiale, car ses postulats de base modélisent mieux la réalité pour des données à référence spatiale (Baillargeon S., 2005 ; Bodian A., Dacosta H., et Dezetter A., 2011).

La variation des pluies annuelles moyennes du Diarha et de ses sous bassins reflète celle des pluies annuelles stationnelles avec des pics qui correspondent aux années normales ou excédentaires (1925, 1938, 1951, 1965, 1974, 1999, 2003, et 2015), et des creux qui représentent les années très déficitaires comme 1924, 1968, 1983, 1984, 2001, 2002 et 2006 (Fig.143). On constate l'existence de quatre périodes bien distinctes qui confirme d'une part, la tendance à la hausse de la pluviosité entre 1950 et 1967, d'autre part, sa baisse entre 1968 et 1993 ; la période avant 1950 et depuis le milieu des années 90 se ressemblent, entourant la moyenne par une forte variabilité interannuelle. La reprise des pluies, amorcée depuis la décennie 1991-2000, s'est accentuée au cours de la décennie 2001-2010 qui marque un retour des conditions pluviométriques à leur niveau moyen (Tab.48). Cette reprise des pluies est même au-dessus de la moyenne de long terme au niveau des sous bassins de Mbéma, Bilèle, et Gokodou, au nord et au sud-ouest du bassin du Diarha. Les plus faibles pourcentages de reprise des pluies sont notés dans les sous bassins de Fangama (97%), Dakately et de Diouguel (95%), à l'est du Diarha.

Tableau 48. Pluies moyennes décennales et de long terme (1921-2016) des sous bassins.

Bassins	1921-2016	1921-1930	1931-1940	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	% Reprise des pluies
Termessé	<u>1198</u>	1237	1284	1195	1335	1237	1124	1041	1133	<u>1189</u>	99
Niogola	<u>1217</u>	1255	1325	1209	1359	1260	1159	1074	1143	<u>1192</u>	98
Fangama	<u>1205</u>	1256	1288	1196	1341	1244	1159	1067	1132	<u>1166</u>	97
Diouguel	<u>1109</u>	1139	1177	1143	1186	1323	1007	977	1001	<u>1057</u>	95
Dakatély	<u>1101</u>	1130	1168	1136	1177	1319	995	972	990	<u>1047</u>	95
Kéwé	<u>1096</u>	1119	1156	1109	1172	1269	997	961	1019	<u>1073</u>	98
Gokodou	<u>1098</u>	1118	1154	1096	1177	1243	1002	957	1044	<u>1098</u>	100
Bilèlè	<u>1106</u>	1123	1161	1096	1188	1237	1009	959	1065	<u>1117</u>	101
Mbéma	<u>1103</u>	1119	1155	1088	1183	1224	1007	955	1068	<u>1119</u>	102





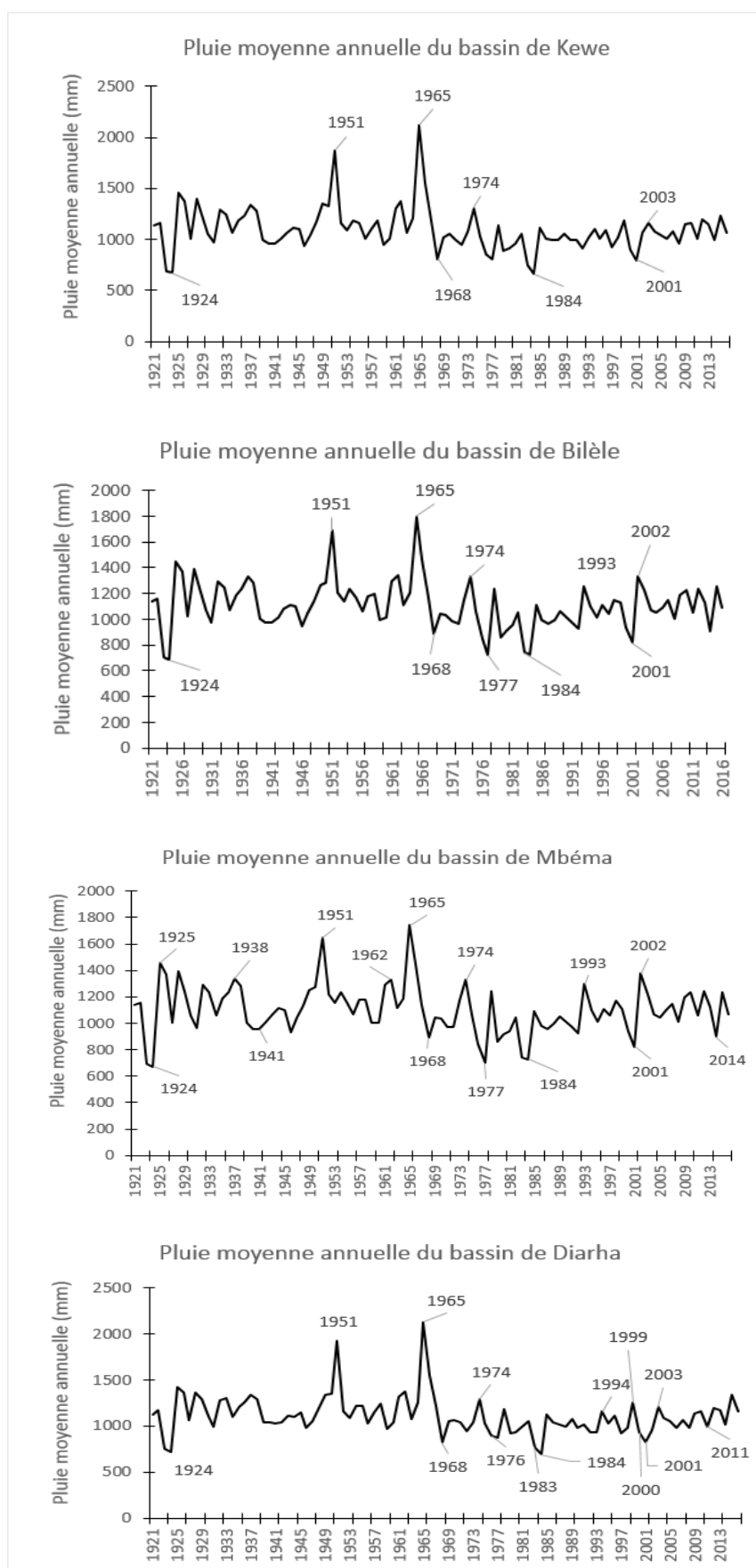
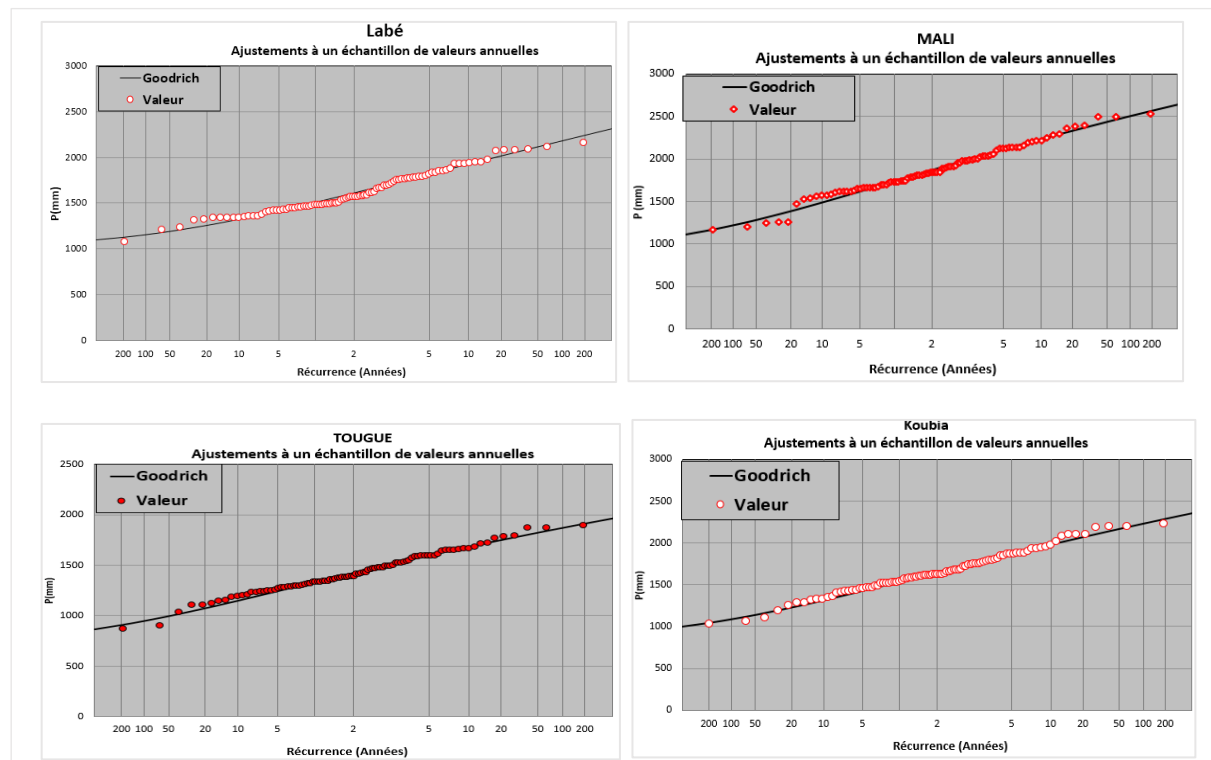


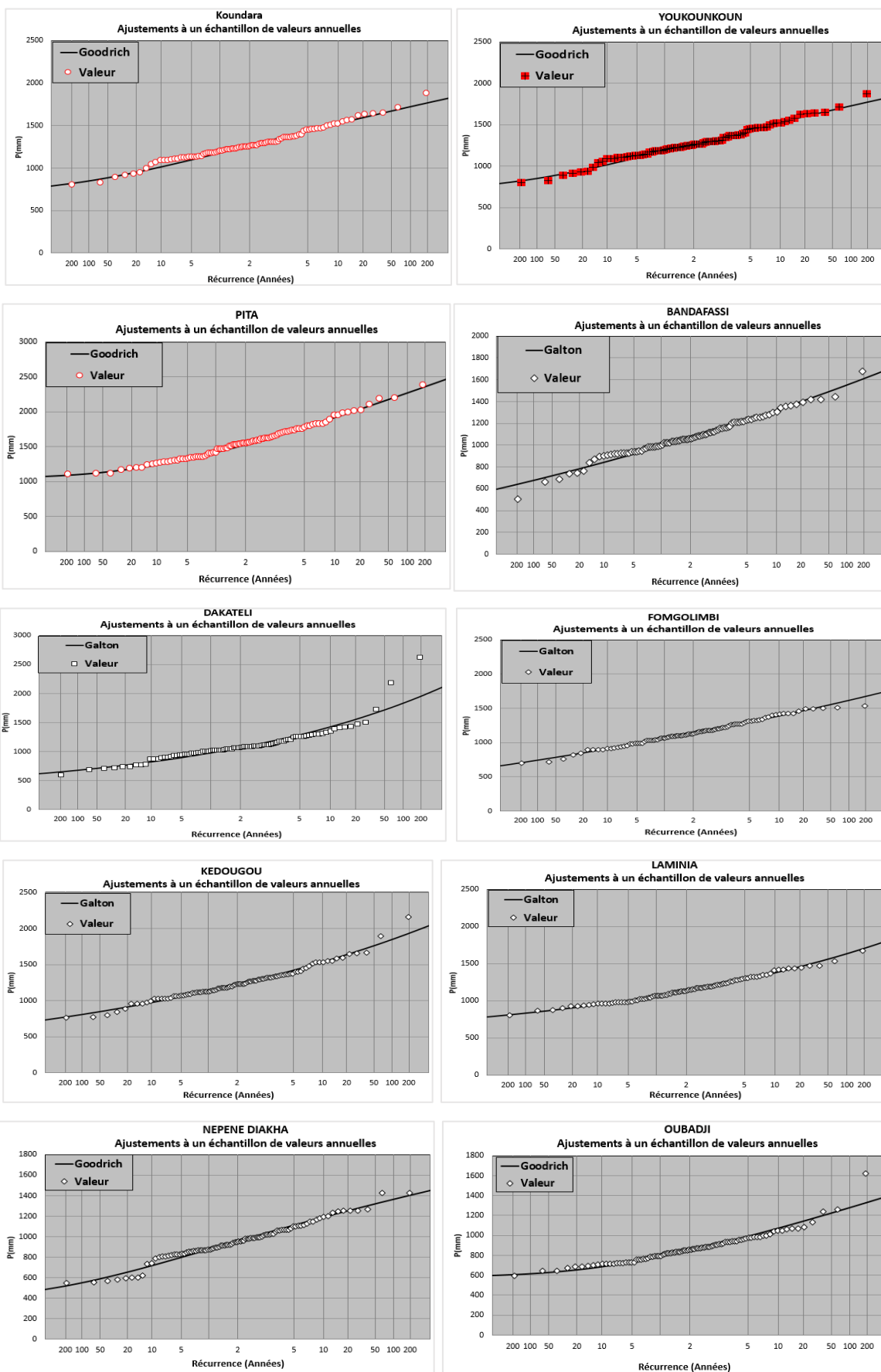
Figure 143. Variation annuelle des lames d'eau précipitées du Diarha et de ses sous bassins de 1921 à 2016

IV.3.8. Analyse fréquentielle et détermination des quantiles secs et humides

L'étude fréquentielle des pluies annuelles est réalisée grâce au logiciel Hydraccess. L'objectif de cette étude est de trouver un modèle fréquentiel qui décrit le mieux possible le comportement statistique des données pluviométriques des stations du bassin. Ce modèle est obtenu par ajustement d'une fonction de distribution statistique théorique sur un échantillon de données observées, censées être issues d'une même population mère. Connaissant la probabilité d'apparition d'un événement spécifique, il est alors possible d'en déterminer sa valeur à partir d'une telle courbe de distribution (Meylan P., et Musy A., 1999). La fréquence d'apparition de certains événements extrêmes est une donnée capitale à prendre en compte dans les problèmes d'aménagement et de gestion des risques liés aux inondations.

La meilleure loi choisie pour l'ajustement des données est celle qui tient compte des valeurs extrêmes au sens du test de Brunet- Moret Y. (1977). Ce test mesure l'écart entre les valeurs extrêmes (faible et forte) avec les distributions (lois) théoriques ; la meilleure loi est celle qui a le plus faible écart. Les figures ci-dessous montrent que les lois de Goodrich et de Galton s'ajustent le mieux aux données pluviométriques annuelles.





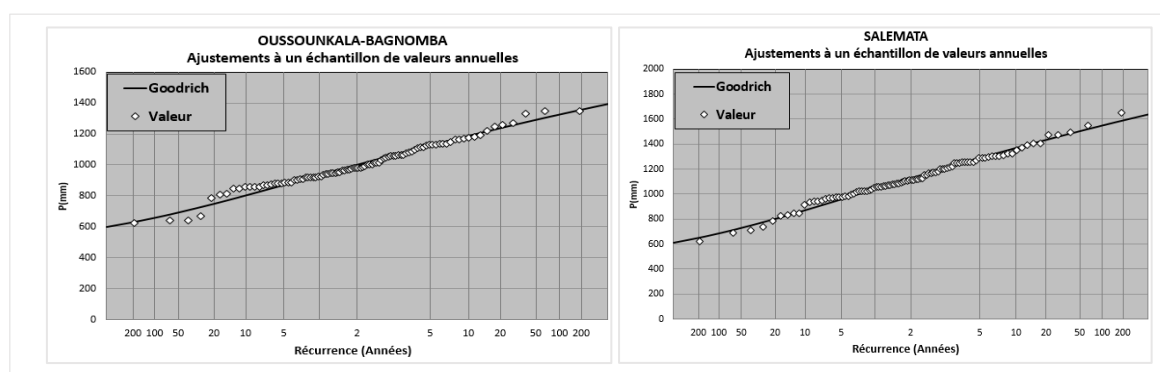


Figure 144. Ajustement des pluies annuelles des stations du bassin du Diarha (1921-2016)

Les données des pluies annuelles consignées dans le tableau 49 s'étendent de la centennale sèche à la centennale humide. Les résultats des paramètres tels que la médiane et le coefficient d'irrégularité (K3 : qui est le rapport entre la décennale humide et la décennale sèche) y sont également présentés. Une pluie, d'au moins 1612 mm (médiane), est attendue à Labé en moyenne tous les deux (2) ans. À Salemata, Youkounkoun et Kédougou cette pluie moyenne est respectivement de 1125 mm, 1273 mm et 1221 mm, sur la même période de retour. Ceci met en évidence les deux gradients pluviométriques rencontrés dans le bassin du Diarha et la forte irrégularité des apports pluviométriques confirmée par le coefficient d'irrégularité (K3).

Tableau 49. Bassin versant du Diarha - Pluies annuelles récurrentielles (mm).

	Récurrences sèches					Médiane	Récurrences humides					K3
Fréquence	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	
Récurrences (années)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	
Labé	747	867	1040	1184	1345	1612	1830	1928	2002	2079	2127	1.6
Mali	1218	1281	1386	1487	1616	1868	2111	2233	2330	2436	2505	1.5
Tougué	950	998	1076	1151	1245	1426	1598	1683	1751	1824	1871	1.5
Koubia	1084	1136	1224	1311	1422	1645	1864	1975	2064	2162	2225	1.5
Koundara	850	888	952	1016	1099	1268	1439	1526	1597	1674	1725	1.5
Youkounkoun	853	891	955	1019	1103	1273	1444	1531	1601	1679	1730	1.5
Pita	1111	1136	1185	1242	1327	1532	1778	1918	2038	2176	2270	1.5
Bandafassi	679	721	786	845	920	1071	1234	1325	1402	1492	1554	1.6
Dakately	674	708	763	818	892	1065	1285	1424	1553	1715	1834	1.7
Fongolimbi	745	787	852	911	986	1137	1299	1389	1466	1555	1616	1.5
Kédougou	804	845	909	970	1050	1221	1419	1535	1637	1761	1849	1.6
Laminia	836	863	907	950	1007	1133	1284	1376	1459	1560	1634	1.4
Nepin Diakha	548	587	652	715	796	955	1110	1188	1250	1318	1362	1.7
Oubadji	618	631	658	689	736	852	993	1075	1145	1226	1282	1.6
Oussoukalla	656	691	747	801	869	1000	1125	1187	1237	1290	1325	1.5
Salemata	684	728	800	869	956	1125	1288	1368	1433	1502	1547	1.6

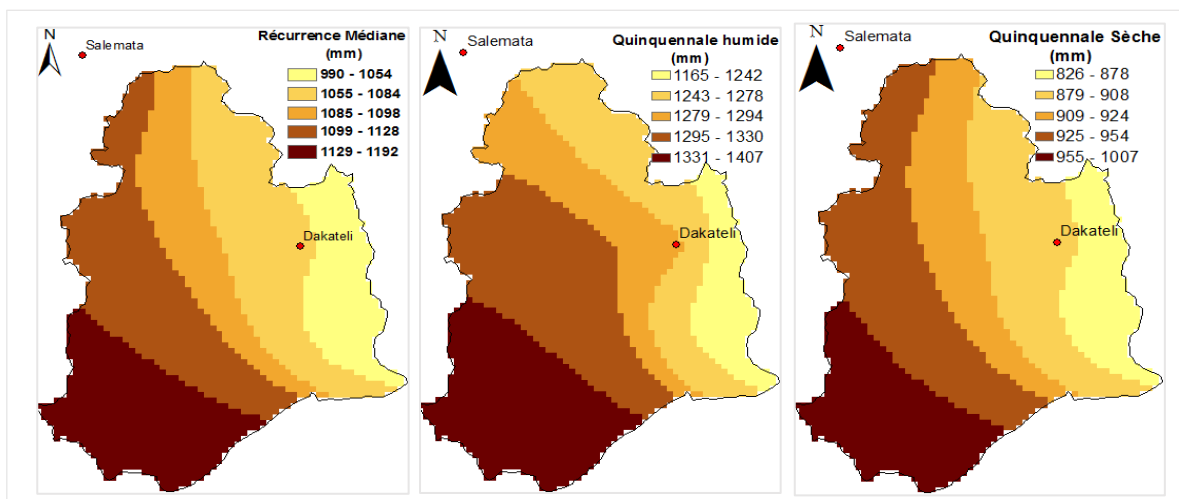
La figure 145 montre les cartes isovaleurs des lames d'eau précipitées de fréquences sèche et humide. Des relations entre la valeur de la lame d'eau précipitée et les pluies moyennes de

fréquences sèches et humides ont été recherchées à partir des seize postes qui ont fait l'objet de l'étude statistique :

- $P_{med} = 1.02 P_{moy} + 17.25$; $r = 0.996$; $nb = 16$
- $P_{quinh} = 1.12 P_{moy} + 17.94$; $r = 0.996$; $nb = 16$
- $P_{quins} = 0.88 P_{moy} + 21.66$; $r = 0.992$; $nb = 16$
- $P_{decs} = 0.81 P_{moy} + 30.3$; $r = 0.981$; $nb = 16$
- $P_{dech} = 1.16 P_{moy} + 34.1$; $r = 0.988$; $nb = 16$
- $P_{vich} = 1.19 P_{moy} + 85.69$; $r = 0.934$; $nb = 16$
- $P_{vics} = 0.77 P_{moy} + 44.36$; $r = 0.956$; $nb = 16$
- $P_{cinqh} = 1.20 P_{moy} + 85.69$; $r = 0.938$; $nb = 16$
- $P_{cinqs} = 0.66 P_{moy} + 66.97$; $r = 0.886$; $nb = 16$
- $P_{centh} = 1.20 P_{moy} + 110.41$; $r = 0.903$; $nb = 16$
- $P_{cents} = 0.62 P_{moy} + 85.14$; $r = 0.806$; $nb = 16$

Où : P_{med} = pluviométrie annuelle de récurrence médiane ; P_{decs} et P_{dech} = pluviométrie annuelle de récurrences décennales sèches et humides ; P_{quinh} et P_{quins} = pluviométrie annuelle de récurrences quinquennales humides et sèches ; P_{vich} et P_{vics} = pluviométrie annuelle de récurrences vicennales humides et sèches ; P_{cinqh} et P_{cinqs} = pluviométrie annuelle de récurrences cinquantennales humides et sèches ; P_{centh} et P_{cents} = pluviométrie annuelle de récurrences centennales humides et sèches, respectivement ; P_{moy} = pluviométrie annuelle moyenne ; r = coefficient de corrélation de Pearson ; nb = nombre de stations.

Ces relations facilitent l'estimation des pluies caractéristiques à l'emplacement d'un aménagement.



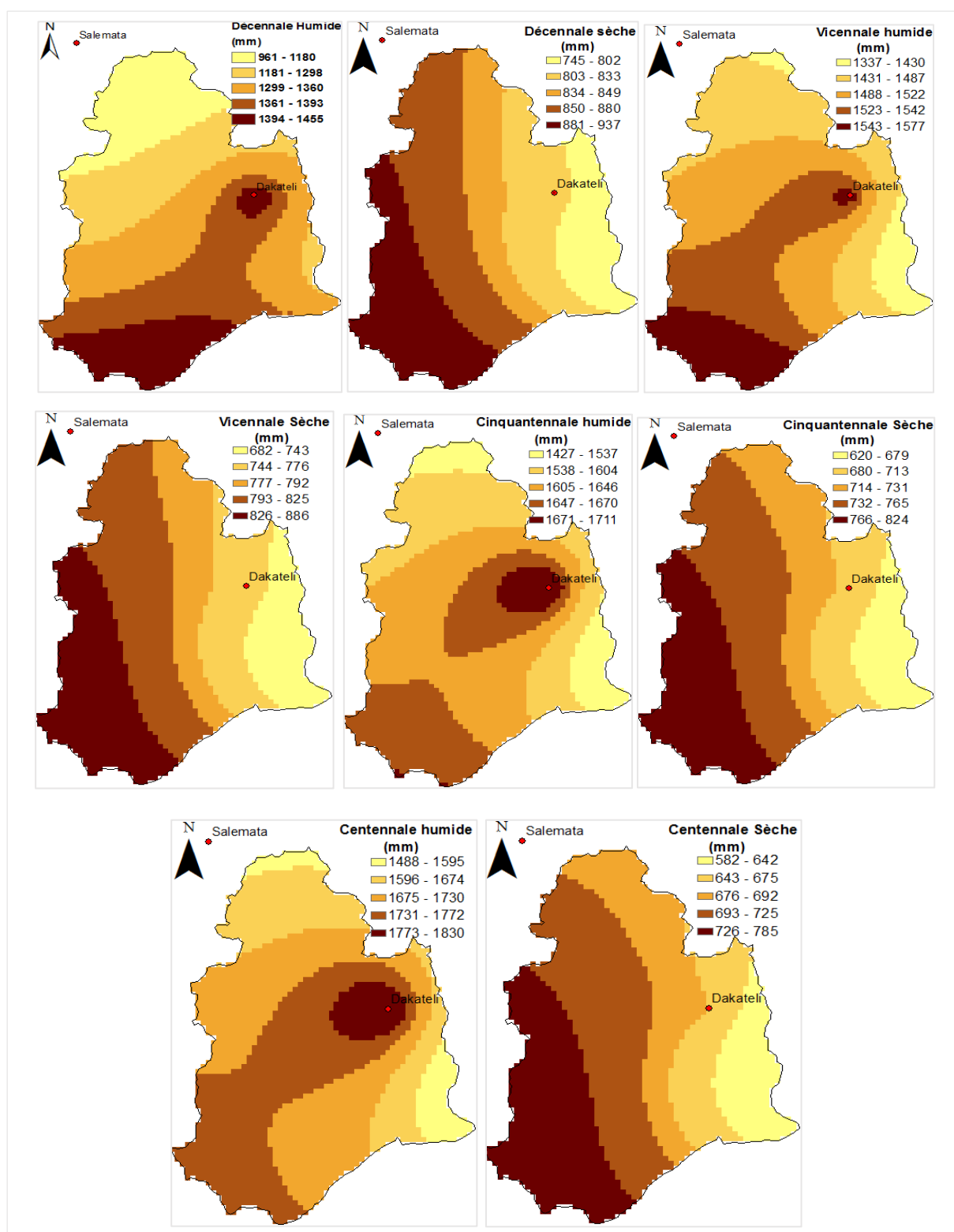


Figure 145. Bassin du Diarha-Cartes isovaleurs des pluies annuelles de récurrences sèches et humides

IV.3.9. Analyse des précipitations mensuelles

L'étude de la pluviométrie mensuelle est capitale. Elle permet de mieux cerner la répartition mensuelle des précipitations d'une année donnée et de connaître par la même occasion la durée de la saison des pluies. Les données utilisées dans cette analyse sont issues du fichier pluviométrique mensuel homogénéisé sur la période 1921-2016 par la méthode du ratio normal (Mohanty P.K., Panigrahi D., et Acharya M., (2014)).

IV.3.9.1. Répartition mensuelle de la pluviométrie des stations du Diarha

L'étude de la répartition mensuelle des précipitations sur la durée d'observation des stations donne un aperçu général de la manière dont la pluie est répartie à l'échelle annuelle. Elle fournit des informations précises sur son évolution diachronique et sur la durée de la saison des pluies.

Les paramètres statistiques représentés dans le tableau 50 sont :

- la moyenne et les quartiles interannuels de la série respective à chaque station ;
- L'écart-type (E-T), et le coefficient de variation (C.V.), deux paramètres de dispersion sur la durée d'observation respective à chaque station ;
- Et le coefficient pluviométrique mensuel (Fm %) qui exprime la contribution de chaque mois au total annuel sur la durée d'observation de chaque station.

La lecture des données du tableau 50 révèle que les valeurs de l'E-T sont élevées d'avril à novembre, avec des pics en août et septembre, mois les plus pluvieux. Elles sont faibles pour les autres mois de l'année. À l'inverse de l'E-T, les faibles valeurs du C.V. sont observées entre avril et novembre au sud (stations de Labé et Mali) et à l'ouest (stations de Youkounkoun et Koundara) et entre mai et novembre au nord (stations de Salemata et Oussoukala) du bassin du Diarha ; les plus fortes pour le reste des mois. Ces deux paramètres appuyés par la moyenne mettent en exergue deux périodes distinctes :

- une première s'étendant d'avril à novembre pour les stations situées au sud et à l'ouest, et de mai à novembre pour celles du nord et de l'est du bassin du Diarha. Ces périodes correspondent à la saison des pluies.
- L'autre de décembre à mars, au niveau des stations situées au sud et à l'ouest, et de décembre à avril, pour celles situées au nord et à l'est du bassin. Ces périodes correspondent à la saison sèche. La durée de la saison pluvieuse varie entre 6 et 7 mois dans le bassin du Diarha.

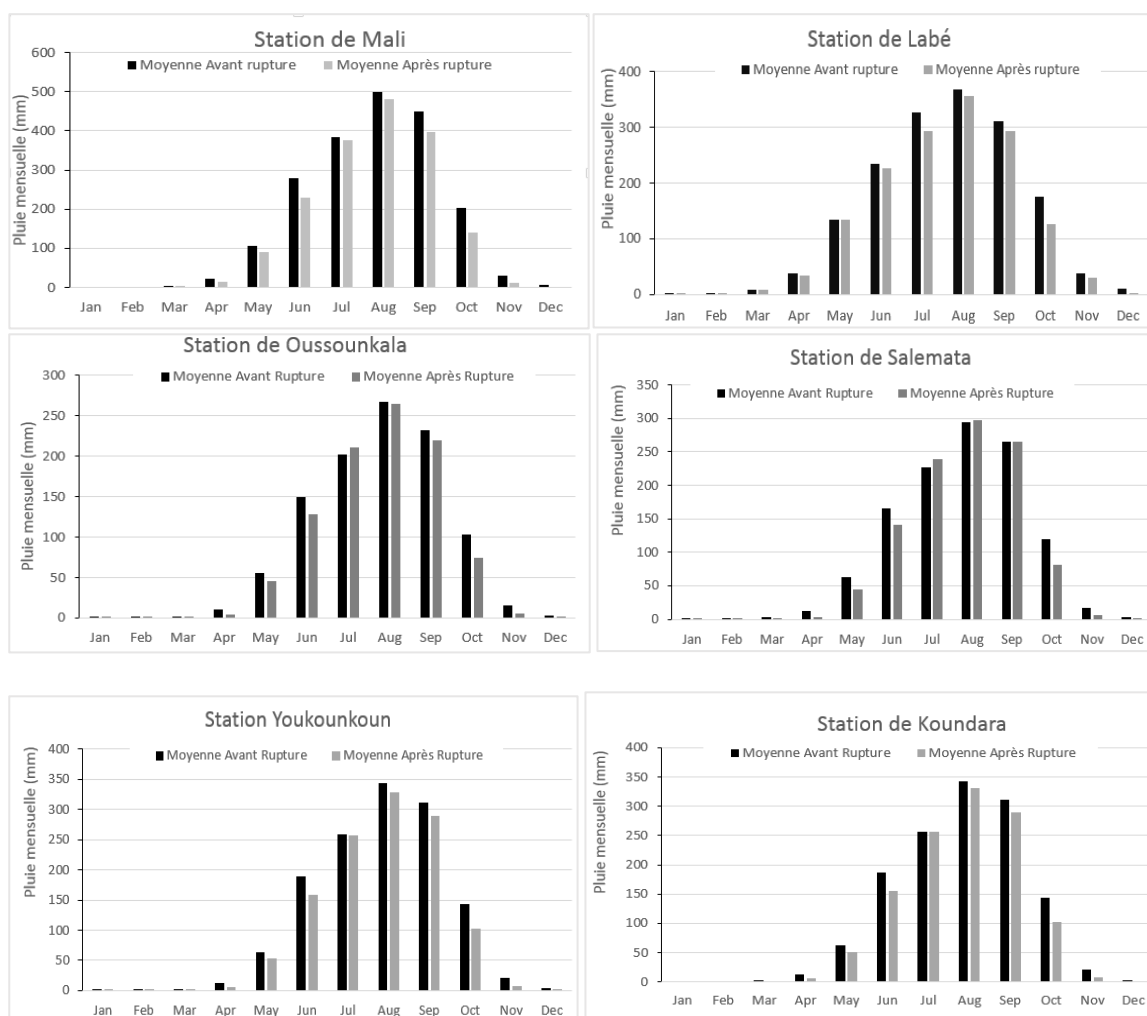
Tableau 50. Distribution moyenne mensuelle des pluies des principales stations du Diarha

Station	Paramètres statistiques	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Labé	Moyenne (1921-2016)	1,7	2,6	8,3	36,5	132,8	230,3	311,6	364,2	305,0	150,8	33,3	6,1
	Ecart-Type	4,9	6,8	19,9	38,6	63,8	70,3	89,9	99,2	102,3	76,9	42,5	17,2
	C.V.	2,89	2,57	2,39	1,06	0,48	0,31	0,29	0,27	0,34	0,51	1,28	2,82
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	16,4	31,2	30,7	25,0	18,2	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	7,0	75,3	195,4	271,1	307,3	242,9	99,9	2,5	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	26,7	135,0	233,2	306,0	371,2	288,7	144,1	15,8	0,0
	Q3	0,1	1,0	5,2	55,4	179,6	280,1	362,5	427,7	376,3	183,4	54,8	0,3
	Q4 (maximum)	29,2	34,6	115,4	177,3	281,0	372,7	591,0	614,5	542,3	430,3	246,2	108,2
	Fm %	0,1	0,2	0,5	2,3	8,4	14,5	19,7	23,0	19,3	9,5	2,1	0,4
Mali	Moyenne (1921-2016)	0,6	1,0	4,2	17,7	97,8	255,3	380,5	490,4	423,3	170,0	20,6	3,2
	Ecart-Type	1,9	2,5	10,6	20,3	43,4	61,9	81,8	94,6	116,1	82,5	24,6	8,6
	C.V.	3,12	2,50	2,50	1,15	0,44	0,24	0,21	0,19	0,27	0,49	1,20	2,69
	Q0 (minimum)	0	0	0	0	3,7	94,7	202	217,6	129,5	33	0	0
	Q1	0,0	0,0	0,0	4,1	64,8	217,4	334,5	432,4	340,7	111,1	3,6	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,1	10,6	96,0	250,9	373,6	499,4	420,4	151,1	11,1	0,0
	Q3	0,1	0,4	1,9	23,1	121,8	287,9	424,0	556,8	482,0	215,6	31,2	1,1
	Q4 (maximum)	14,3	15,1	67,8	105,0	228,6	424,0	589,2	727,0	723,8	427,9	117,5	63,6
	Fm %	0,0	0,1	0,2	0,9	5,2	13,7	20,4	26,3	22,7	9,1	1,1	0,2
Oussoukaka	Moyenne (1921-2016)	0,3	0,4	1,8	8,2	50,2	138,5	206,8	266,0	226,1	87,6	10,0	1,6
	Ecart-Type	1,0	1,0	5,0	10,5	24,5	36,3	50,7	64,1	55,9	41,1	13,1	4,6
	C.V.	3,24	2,45	2,84	1,29	0,49	0,26	0,25	0,24	0,25	0,47	1,31	2,91
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	54,0	95,0	107,0	92,9	6,0	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,9	33,1	110,5	178,2	230,2	187,9	63,4	0,4	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	4,8	50,0	139,8	200,1	271,1	223,8	76,6	5,2	0,0
	Q3	0,1	0,2	0,8	11,5	64,3	161,9	232,2	300,0	254,3	100,8	13,7	0,1
	Q4 (maximum)	7,6	6,3	36,1	55,9	121,7	233,0	409,0	578,0	385,2	227,7	62,5	33,8
	Fm %	0,0	0,0	0,2	0,8	5,0	13,9	20,7	26,7	22,7	8,8	1,0	0,2
Salemata	Moyenne (1921-2016)	0,3	0,5	1,6	8,2	52,7	153,3	232,9	296,0	264,8	99,2	11,2	1,8
	Ecart-Type	1,1	1,4	5,3	12,3	29,1	50,0	59,2	79,6	84,2	51,0	17,7	5,2
	C.V.	3,62	2,81	3,28	1,51	0,55	0,33	0,25	0,27	0,32	0,51	1,58	2,81
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	118,0	127,0	41,0	0,0	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,0	31,6	123,2	196,4	245,0	215,0	63,0	0,0	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	2,4	55,6	156,9	230,0	292,0	250,2	97,4	4,1	0,0
	Q3	0,0	0,1	0,7	11,6	69,7	184,6	273,0	335,5	303,5	127,5	14,4	0,2
	Q4 (maximum)	8,4	8,9	39,9	61,8	138,0	341,5	447,8	560,1	573,5	252,0	110,5	37,5
	Fm %	0,0	0,0	0,1	0,7	4,7	13,7	20,7	26,4	23,6	8,8	1,0	0,2
Youkounkoun	Moyenne (1921-2016)	0,3	0,6	2,1	9,3	58,1	173,3	258,7	337,1	299,1	121,4	13,9	1,9
	Ecart-Type	1,2	1,4	6,6	13,8	35,0	44,9	55,1	86,5	81,3	64,4	18,3	5,9
	C.V.	3,64	2,43	3,13	1,49	0,60	0,26	0,21	0,26	0,27	0,53	1,32	3,13
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,0	138,8	149,4	78,3	0,0	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,1	33,1	141,5	226,3	277,8	251,6	79,4	0,9	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	3,1	54,5	169,7	253,7	335,9	290,6	101,1	7,0	0,0
	Q3	0,2	0,2	0,4	11,9	83,0	206,8	283,2	376,8	355,0	145,3	16,8	0,2
	Q4 (maximum)	9,8	8,1	46,6	72,1	157,1	291,3	479,3	706,4	549,8	393,1	80,7	43,7
	Fm %	0,0	0,0	0,2	0,7	4,6	13,6	20,3	26,4	23,4	9,5	1,1	0,1

Koundara	Moyenne (1921-2016)	0,3	0,6	2,1	9,2	56,8	171,4	257,2	336,6	299,9	121,8	13,8	1,9
	Ecart-Type	1,2	1,4	6,5	13,7	34,9	44,6	54,8	85,9	78,2	63,3	18,3	5,9
	C.V.	3,63	2,43	3,13	1,49	0,61	0,26	0,21	0,26	0,26	0,52	1,32	3,13
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,0	138,0	149,4	119,2	36,4	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,0	32,7	139,9	226,1	278,1	250,2	78,9	0,9	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	3,1	53,8	169,7	244,3	335,9	289,0	100,5	7,0	0,0
	Q3	0,2	0,2	0,4	11,8	81,4	197,6	282,7	376,8	355,0	144,5	16,7	0,2
	Q4 (maximum)	9,8	8,1	46,3	71,7	156,2	289,7	479,3	706,4	549,8	393,1	80,3	43,4
	Fm %	0,0	0,0	0,2	0,7	4,5	13,5	20,2	26,5	23,6	9,6	1,1	0,1
Neppen Diakha	Moyenne (1921-2016)	0,3	0,4	1,5	7,7	50,6	129,4	193,1	253,3	224,9	81,7	9,7	1,5
	Ecart-Type	0,9	1,1	4,6	10,2	35,4	47,9	52,8	72,4	70,5	44,4	12,8	4,3
	C.V.	3,41	2,95	3,06	1,33	0,70	0,37	0,27	0,29	0,31	0,54	1,33	2,80
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,2	89,6	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,0	30,6	103,1	166,9	202,5	182,3	50,0	0,1	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	4,2	48,4	125,9	195,9	247,1	220,8	77,3	4,9	0,0
	Q3	0,1	0,1	0,6	11,2	62,4	152,7	229,8	285,2	268,6	107,9	13,8	0,2
	Q4 (maximum)	7,1	7,5	34,0	52,5	281,9	330,9	330,0	489,2	478,1	214,2	58,8	31,8
	Fm %	0,0	0,0	0,2	0,8	5,3	13,6	20,2	26,5	23,6	8,6	1,0	0,2
Dakately	Moyenne (1921-2016)	0,2	0,4	1,6	8,4	55,5	152,0	223,2	301,1	257,7	89,8	8,8	1,5
	Ecart-Type	1,1	1,1	5,4	15,8	35,5	54,2	59,5	99,1	117,1	66,5	14,5	5,9
	C.V.	4,37	3,00	3,34	1,89	0,64	0,36	0,27	0,33	0,45	0,74	1,64	3,94
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	102,0	108,0	24,5	0,0	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,0	29,7	112,7	185,6	238,9	182,2	43,1	0,0	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	1,8	57,3	147,5	211,0	291,7	249,1	83,1	1,9	0,0
	Q3	0,0	0,0	0,2	10,7	75,5	190,6	262,1	348,4	302,2	109,5	12,0	0,0
	Q4 (maximum)	8,4	7,0	39,9	110,4	219,6	307,9	396,5	664,2	1042,0	391,1	69,2	39,0
	Fm %	0,0	0,0	0,1	0,8	5,0	13,8	20,3	27,4	23,4	8,2	0,8	0,1
Kédougou	Moyenne (1921-2016)	0,1	0,2	0,3	4,2	52,5	167,4	258,0	324,5	308,8	114,0	10,2	0,5
	Ecart-Type	0,5	0,8	1,3	10,3	54,7	64,1	72,1	101,1	93,5	80,8	19,8	3,6
	C.V.	7,09	4,76	5,09	2,44	1,04	0,38	0,28	0,31	0,30	0,71	1,94	6,76
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	122,0	119,5	128,3	0,0	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,0	17,1	117,8	202,8	252,0	234,1	56,0	0,0	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	0,0	39,0	164,0	267,2	327,5	313,3	86,8	0,0	0,0
	Q3	0,0	0,0	0,0	4,0	68,7	204,6	306,9	390,0	364,7	154,4	9,0	0,0
	Q4 (maximum)	4,5	5,6	11,0	70,0	302,7	337,0	501,2	642,6	688,2	417,9	96,6	34,3
	Fm %	0,0	0,0	0,0	0,3	4,2	13,5	20,8	26,2	24,9	9,2	0,8	0,0
Bandafassi	Moyenne (1921-2016)	0,3	0,5	1,7	8,5	53,7	146,3	222,0	280,3	257,7	95,3	10,4	1,7
	Ecart-Type	1,1	1,4	5,1	11,4	31,5	43,8	50,9	65,1	76,4	48,3	14,3	4,9
	C.V.	3,48	2,62	3,01	1,35	0,59	0,30	0,23	0,23	0,30	0,51	1,38	2,84
	Q0 (minimum)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	51,8	74,5	100,1	99,4	15,0	0,0	0,0
	Q1	0,0	0,0	0,0	0,0	33,2	117,4	188,4	233,0	199,8	60,7	0,0	0,0
	Q2 (médiane)	0,0	0,0	0,0	4,9	55,1	142,9	219,2	277,3	251,0	83,7	5,0	0,0
	Q3	0,1	0,1	0,7	12,0	67,4	173,6	262,9	318,3	305,5	122,7	13,8	0,2
	Q4 (maximum)	8,1	8,6	38,6	59,8	212,6	278,0	395,0	501,3	516,3	243,6	66,9	36,2
	Fm %	0,0	0,0	0,2	0,8	5,0	13,6	20,6	26,0	23,9	8,8	1,0	0,2

IV.3.9.2. Variations mensuelles de la pluviométrie des stations du Diarha

Les graphiques des variations mensuelles des précipitations avant et après rupture révèlent que le climat du bassin du Diarha est marqué par une variabilité inter-mensuelle et spatiale de la pluviométrie (Fig.146). Depuis 1968, on note une baisse considérable des totaux pluviométriques mensuels, laquelle se caractérise dans toutes les stations par un retard dans l'installation de la saison pluvieuse et un retrait précoce du Front Intertropical (FIT). La saison des pluies débute dès avril au sud et à l'ouest du bassin (Mali, Labé, Koundara et Youkounkoun) et se termine en novembre. Quant au nord et à l'est (Salémata, Oussoukalla, Dakately, Neppen Diakha, Kédougou et Bandafassi), l'hivernage ne débute véritablement qu'en mai et s'achève en octobre. Sur l'ensemble des stations du bassin, le mois d'août est le plus pluvieux, suivis par ceux de septembre et juillet. Ces trois mois concentrent plus de 70% des apports pluviométriques dans toutes les stations étudiées.



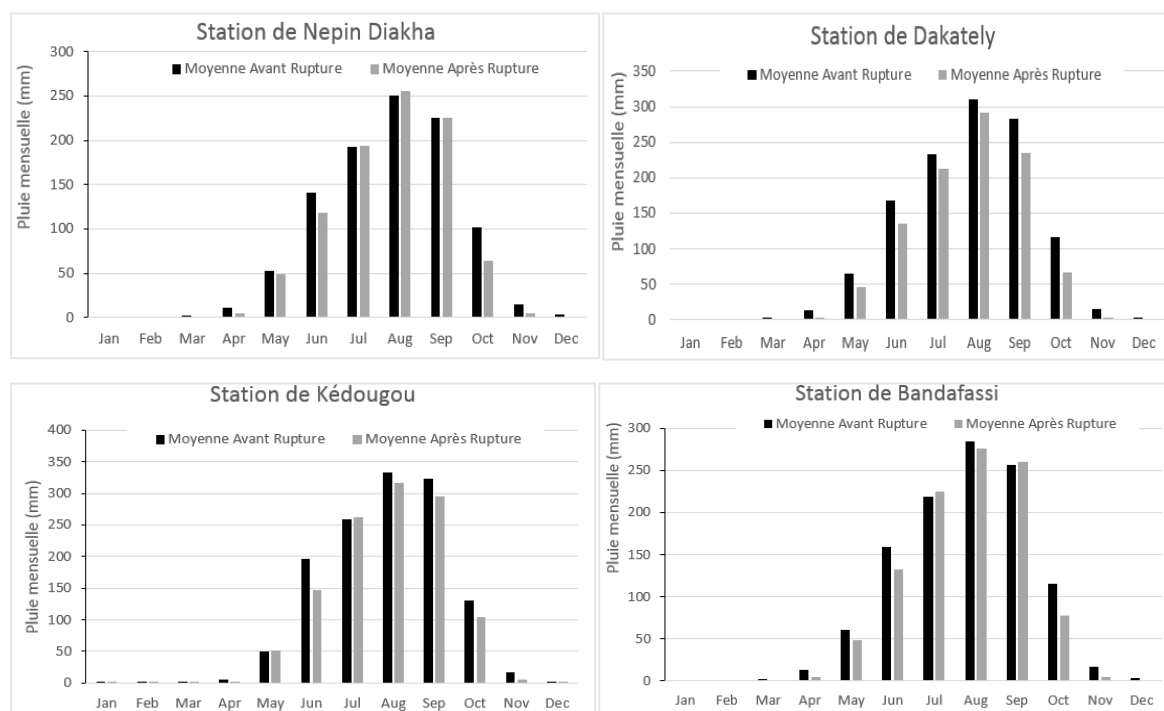


Figure 146. Variations saisonnières des pluies des principales stations du Diarha avant et après rupture.

IV.3.9.3. Calcul de la pluie moyenne mensuelle surfacique

Les données utilisées dans cette étude sont issues du fichier pluviométrique mensuel homogénéisé des 16 stations du bassin. À partir des observations de ces différentes stations, nous avons calculé la pluie moyenne mensuelle sur le bassin du Diarha. Sa connaissance est d'une importance capitale car elle permet d'avoir un aperçu global de la manière dont les pluies moyennes annuelles se répartissent à l'échelle saisonnière sur le bassin. La méthode appliquée est celle du krigeage, intégrée dans le logiciel Hydraccess (Vauchel P., 2004).

IV.3.9.3.1. Distribution mensuelle de la pluie moyenne surfacique

L'analyse du tableau 51 révèle que les lames précipitées sont surtout concentrées entre avril et novembre. Elles oscillent de mai à août, diminuent progressivement d'août à octobre, puis brutalement d'octobre à décembre. Le maximum se situe en août (304,9 mm). Les mois de juillet et septembre peuvent dans certains cas prendre le relais. C'est ainsi qu'en 1984, le maximum est observé en juillet (246,5 mm), et en 1975 le pic de maximum se situe en septembre (401,4 mm) (Cf. annexe). L'analyse des coefficients pluviométriques mensuels ($F_m\%$) révèle

que les mois de juillet, août et septembre concentrent en moyenne 72% des apports pluviométriques annuels (Tab.51).

À partir du mois d'avril, les valeurs enregistrées deviennent de plus en plus intéressantes. Les hauteurs précipitées sont passées successivement de 8,4 mm en avril à 51,1 mm en mai ; 151,3 mm (juin), 229 mm (juillet), 304,9 mm (août) et 262,6 mm (septembre) (Tab.51). La période d'avril à septembre est marquée par une hausse des lames précipitées.

En juin, la mousson s'installe solidement dans le bassin. Les lames précipitées atteignent 150 mm dans la plupart des cas et peuvent dépasser 200 mm certaines années (en juin 1966, 223 mm ; 204,9 mm en 1985 et 206,5 mm en 2003, par exemple). L'influence de la mousson s'accroît de plus en plus durant les mois de juillet, août et septembre. Ceci étant, la mousson est bien installée sur le bassin du Diarha. Elle présente ainsi, toute sa générosité et son irréfutable efficacité pluviométrique.

Les mois de juillet, août et septembre, comme le révèlent les lames précipitées, présentent toutes les caractéristiques d'été. Sur les 97 ans d'observations (1921-2016), elles sont supérieures à 200 mm. Cette pluviosité fléchira à partir d'octobre.

En 1975, de 401,4 mm en septembre, les lames précipitées tombent à 32 mm en octobre, et de 261,2 mm (septembre) à 51,2 mm (octobre) en 2003, par exemple. Cette baisse des apports pluviométriques traduit le retour de l'équateur météorologique vers sa position d'hiver. Cependant, les valeurs enregistrées au mois d'octobre restent toujours élevées. Sa moyenne interannuelle est égale à 93,9 mm : la mousson exerce encore son influence souveraine.

En novembre, le régime de mousson est remplacé par le régime d'Harmattan. Les lames précipitées diminuent d'avantage et rapidement. De 51,2 mm en octobre 2003, elles tombent à 3,2 mm. Dans le cycle annuel, novembre peut être considéré comme un mois charnière.

Tableau 51. Distribution statistique de la pluie moyenne mensuelle surfacique.

	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Années
Moyenne (1921-2016)	0.3	0.5	1.6	8.4	53.1	151.3	229.0	304.9	262.6	93.9	9.6	1.6	1117
E.T.	1.1	1.1	4.9	13.0	28.5	43.0	45.4	79.5	85.5	55.3	13.8	5.2	
C.V	3.4	2.4	3.1	1.5	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.6	1.4	3.3	
Q0 (Minimum)	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	34.2	120.7	155.0	127.6	11.6	0.0	0.0	
Q1	0.0	0.0	0.0	1.0	31.4	119.2	201.3	250.5	204.0	55.2	0.9	0.0	
Q2 (Médiane)	0.0	0.0	0.1	3.1	53.0	150.1	225.7	301.3	253.2	82.8	4.0	0.0	
Q3	0.1	0.2	0.8	9.9	73.6	177.8	256.6	346.3	299.6	112.8	11.8	0.4	
Q4 (Maximum)	9.0	6.6	36.7	71.2	155.3	272.6	352.5	564.0	769.3	351.1	63.4	34.5	
Fm (%)	0.0	0.0	0.1%	0.7%	4.8%	13.6%	20.5%	27.3%	23.5%	8.4%	0.9%	0.1%	
Moyenne (1921-1967)	0.6	0.6	2.5	12.4	61.3	166.3	234.7	314.0	279.1	116.2	15.2	3.0	1206
E.T.	1.6	1.1	6.6	14.5	29.5	45.8	51.6	83.9	96.9	62.9	15.5	7.1	
C.V	2.6	2.0	2.6	1.2	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.5	1.0	2.4	
Q0 (Minimum)	0.0	0.0	0.0	0.1	3.3	68.2	138.9	160.4	127.6	45.7	0.4	0.0	
Q1	0.0	0.0	0.0	2.4	36.1	132.9	200.9	263.8	219.9	81.3	3.8	0.0	
Q2 (Médiane)	0.0	0.0	0.2	4.9	62.8	170.8	224.9	304.6	259.3	105.4	10.4	0.2	
Q3	0.4	0.5	1.1	18.9	75.3	196.7	272.1	346.1	312.1	118.7	18.7	2.6	
Q4 (Maximum)	9.0	4.4	36.7	71.2	155.3	272.6	352.5	564.0	769.3	351.1	63.4	34.5	
Fm (%)	0.0	0.0	0.2%	1.0%	5.1%	13.8%	19.5%	26.0%	23.1%	9.6%	1.3%	0.2%	
Moyenne (1968-1993)	0,05	0,37	0,63	4,10	40,06	131,57	233,66	276,38	235,37	65,01	4,04	0,43	992
E.T.	0,10	0,76	1,15	4,66	23,40	39,76	35,99	72,28	63,49	32,58	5,83	1,39	
C.V	1,98	2,05	1,84	1,14	0,58	0,30	0,15	0,26	0,27	0,50	1,44	3,19	
Q0 (Minimum)	0,00	0,00	0,00	0,10	8,00	34,20	175,60	155,00	138,40	11,60	0,10	0,00	
Q1	0,00	0,00	0,00	1,15	22,38	108,68	204,98	227,78	186,63	34,68	0,73	0,00	
Q2 (Médiane)	0,00	0,05	0,15	2,05	36,70	125,10	227,55	252,75	228,00	67,75	1,70	0,00	
Q3	0,00	0,45	0,68	5,75	51,40	160,93	252,60	336,60	278,03	79,43	4,88	0,10	
Q4 (Maximum)	0,30	3,50	5,20	21,30	93,00	204,90	308,20	447,80	401,40	151,30	25,50	7,00	
Fm (%)	0,01	0,04	0,06	0,41	4,04	13,27	23,56	27,87	23,73	6,56	0,41	0,04	
Moyenne (1994-2016)	0,1	0,4	0,9	4,8	51,1	143,2	212,1	318,5	259,9	80,9	4,5	0,0	1076
E.T	0,41	1,38	3,30	13,75	26,48	28,26	38,30	72,87	76,62	38,58	12,32	0,09	
C.V	3,40	3,83	3,87	2,84	0,52	0,20	0,18	0,23	0,29	0,48	2,75	2,88	
Q0 (Minimum)	0,00	0,00	0,00	0,00	15,80	89,80	120,70	172,70	139,40	26,40	0,00	0,00	
Q1	0,00	0,00	0,00	0,10	30,75	119,05	198,75	284,75	200,35	53,00	0,00	0,00	
Q2 (Médiane)	0,00	0,00	0,00	0,80	46,30	147,10	221,30	333,80	261,20	71,40	0,50	0,00	
Q3	0,10	0,00	0,15	3,10	68,95	160,40	238,55	352,05	321,25	98,75	3,65	0,00	
Q4 (Maximum)	2,00	6,60	15,90	66,20	110,60	206,50	260,50	457,10	379,70	156,30	59,60	0,40	
Fm (%)	0,01	0,03	0,08	0,45	4,75	13,30	19,71	29,59	24,14	7,52	0,42	0,00	

IV.3.9.3.2. Variations interannuelles de la pluie moyenne mensuelle surfacique

La lame d'eau précipitée connaît des fluctuations très importantes d'un mois à l'autre, lesquelles sont plus marquées après la rupture climatique de 1967. L'analyse de la figure 147 montre que la sécheresse des années 1968-1993 a surtout affecté les mois les plus humides : les apports des mois de juillet, août et septembre ont subi une baisse comprise entre 0,4% (juillet) et 15,7% (septembre). Ces résultats confirment Le Barbé L., Lebel T., et Tapsoba D., (2002) qui affirment que le déficit des précipitations sur la période plus sèche après rupture est principalement lié à la diminution du nombre des événements se produisant au cœur de la saison des pluies.

La sécheresse s'est également manifestée par un retard dans l'installation de la saison des pluies et par un retrait précoce du front intertropical. Le début de la saison des pluies, amorcé dès le mois d'avril avant 1967, se voit décaler jusqu'en mai après la rupture climatique. Cependant, sur la période récente (1994-2016), se dégage une nouvelle tendance humide où les apports des mois pluvieux ont atteint à 96% leurs conditions de long terme ; Durant cette période, c'est surtout les apports du mois d'août et de septembre qui ont augmenté ; ceux d'août, mois le plus pluvieux, sont même supérieurs aux conditions avant rupture (Fig.148). Ces fluctuations des apports mensuels affecteront sans doute l'écologie du bassin du Diarha ainsi que toutes les activités socioéconomiques dépendant de ses ressources.

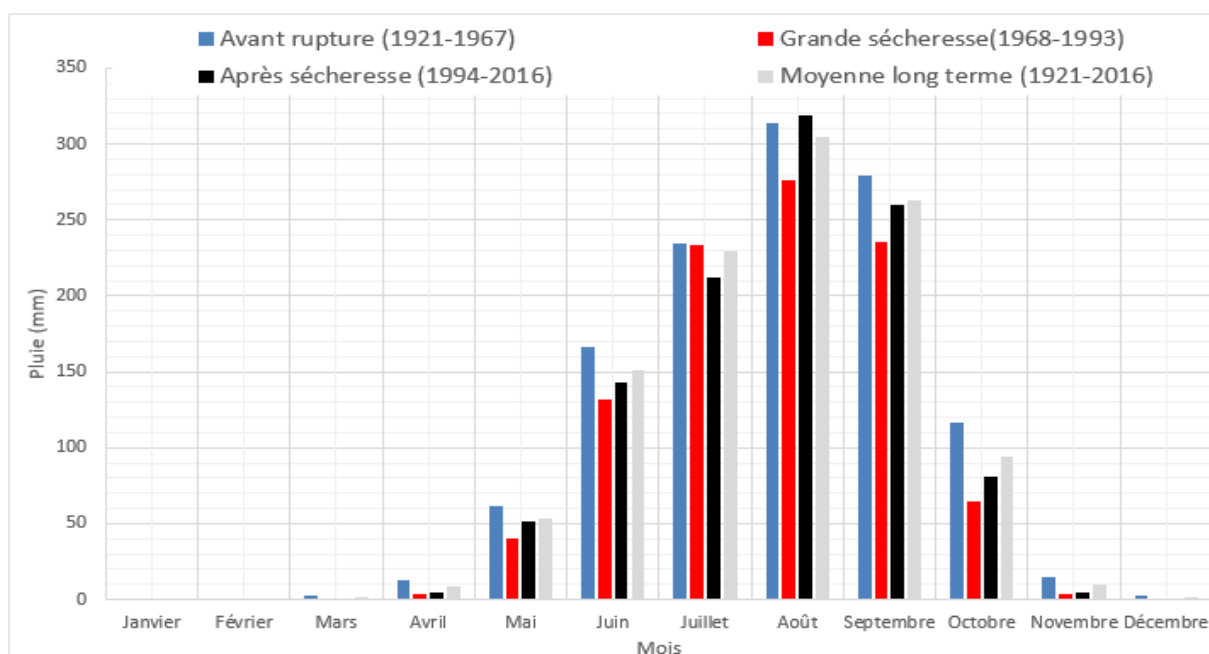


Figure 147. Variation interannuelle des lames d'eau précipitées moyennes mensuelles

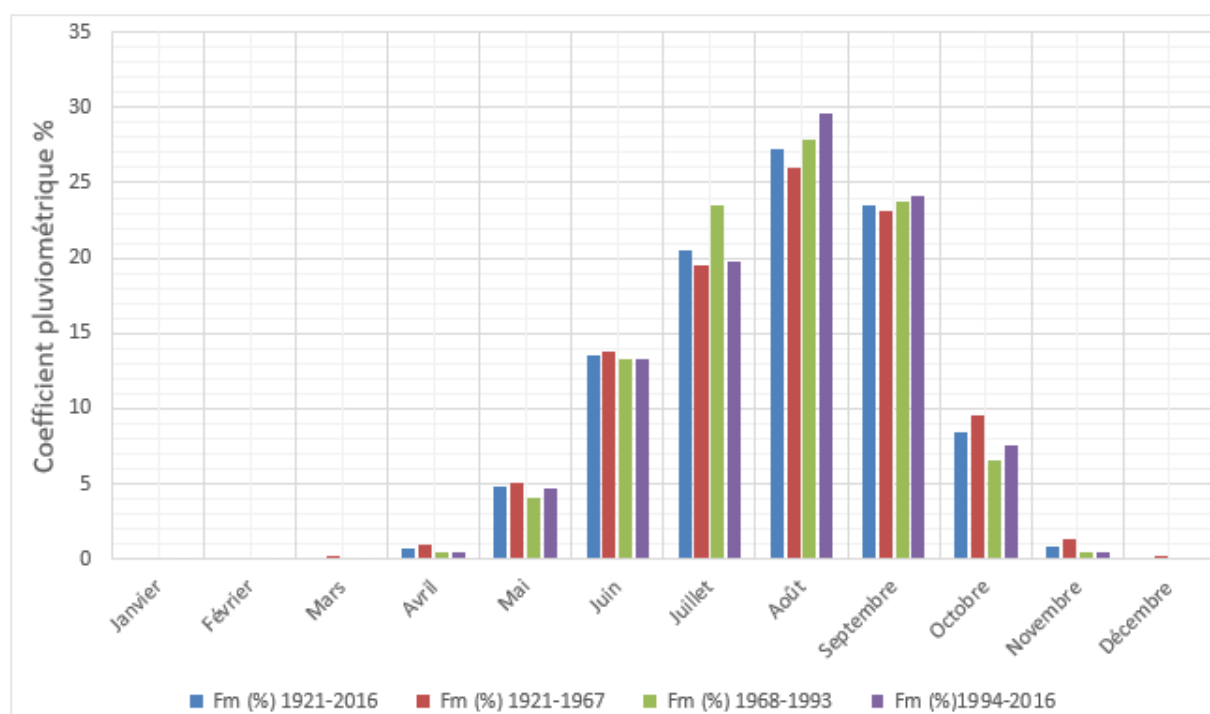


Figure 148. Variation interannuelle des coefficients pluviométriques mensuelles (Fm%)

IV.3.9.4. Analyse fréquentielle de la pluie moyenne mensuelle surfacique

L'analyse fréquentielle a porté sur les mois pluvieux et a été faite de la même manière que les pluies annuelles sous le logiciel Hydraccess. La loi de Goodrich s'ajuste le mieux aux échantillons des lames d'eau précipitées mensuelles. L'examen du tableau 52 montre qu'entre juin et septembre, le bassin du Diarha enregistre 930,5 mm de pluies en moyenne tous les deux ans (médiane), ce qui représente 87% des apports pluviométriques annuels. En récurrence décennale humide, une pluie, d'au moins 413,5 mm, est attendue au mois d'août ; tandis qu'en récurrence sèche, celle-ci ne représente que 206,2 mm sur la même période de retour.

Tableau 52. Bassin du Diarha – Lames d'eau précipitées mensuelles récurrentielles (mm).

Loi de Goodrich	Récurrences sèches					Médiane	Récurrences humides				
Fréquence	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Récurrences (années)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100
Avril	0	0	0	0	0.5	3.3	12.7	22.3	33.8	51.6	66.8
Mai	5.3	7.8	12.8	18.8	27.8	49.9	77.1	92.7	106.2	121.8	132.4
Juin	53.9	63.3	79.0	94.2	113.8	152.3	190.0	208.9	224.0	240.6	251.3
Juillet	133.0	141.0	155.2	169.6	188.8	228.5	269.5	290.7	307.9	327.1	339.6
Août	160.0	169.1	186.7	206.2	234.2	298.9	372.7	413.5	447.8	486.9	513.2
Septembre	132.7	138.3	150.4	165.3	188.9	250.9	331.3	379.2	421.2	470.8	505.1
Octobre	16.6	19.5	25.9	34.2	47.9	85.4	136.6	167.9	195.8	229.1	252.4
Novembre	0	0	0	0	0.7	4.1	14.9	25.7	38.2	57.1	73.1
Décembre	0	0	0	0	0	0.02	0.4	1.9	5.4	15.7	30.2

V.3.10. Pluviométrie Journalière

La pluie journalière « constitue la base des observations » (Mendy A., 2010), effectuées sur une durée de 24 heures (06h00mn du Jour-J à 06h00mn du lendemain). Mais la pluie reçue en 24 heures, qui peut être la somme d'une ou plusieurs pluies tombées au cours d'une journée, est un paramètre déterminant dans l'étude et le calcul de crues sur petits bassins qui réagissent avec un faible temps de réponse aux impulsions de la pluie. En outre, son étude peut contribuer à améliorer nos connaissances sur les aspects des déficits pluviométriques saisonniers et annuels ainsi que sur les changements susceptibles d'affecter l'évolution des précipitations (Kouassi A. M., Kouamé K. F., Koffi Y. B., *et al.* 2010). Ces déficits peuvent résulter de la diminution de la fréquence des précipitations journalières maximales ayant atteint ou dépassé un certain seuil.

Une analyse critique des données journalières conduit à éliminer de l'échantillon des stations les années lacunaires. De ce fait, l'échantillon étudié ici est nettement plus court que l'échantillon considéré dans l'étude des pluies mensuelles et annuelles. Par ailleurs, les périodes d'observation sont extrêmement variables d'une station à une autre ; la signification des résultats obtenus sera d'autant plus grande que la période d'observation portera sur une plus longue durée (Dacosta H., 1989). Décomptées en fonction de la taille de l'échantillon, les stations se répartissent comme suit :

- stations dont la durée d'observation est comprise entre 30 et 100 ans (Kédougou, Labé, Salemata, Fongolimbi, Tougué, Bandafassi, Koundara, Youkounkoun). L'information obtenue à partir de tels échantillons est considérée comme bonne. Cela suppose qu'un complément de mesures n'apporterait dans l'analyse statistique que des variations relativement minimales.
- Stations dont la durée d'observation est inférieure à 30 ans (Mali, Koubia, Pita, Neppen Diakha, Oussoukala, Dakately). Il est évident que l'analyse des échantillons courts, portant sur moins de 30 années d'observation, aboutit à des résultats beaucoup moins fiables, ces échantillons pouvant ne pas être représentatifs du régime général des précipitations locales. Il a cependant paru intéressant d'en donner les résultats pour mieux comprendre la répartition des apports en fonction de la latitude.

IV.3.10.1. Caractérisation des pluies journalières

L'approche adoptée pour caractériser les pluies journalières du bassin du Diarha comporte les opérations suivantes : (i) calcul du nombre de jours de pluies par an, (ii) étude des fractions pluviométriques journalières, et (iii) l'analyse fréquentielle des précipitations journalières maximales ayant atteint ou dépassé un certain seuil.

IV.3.10.1.1. Calcul du nombre de jours de pluies

Le nombre moyen de jours de pluies par an a été calculé à partir des chroniques des pluies journalières des stations de l'étude. Est considérée comme étant pluvieuse, toute journée de l'année qui reçoit une quantité de précipitation supérieure ou égale à 1 mm.

Les échantillons courts, portant sur moins de 30 années d'observation ne permettent pas de faire une analyse comparative du nombre d'épisodes pluvieux de part et d'autre des dates de rupture. C'est pourquoi, les stations de Kédougou et Labé où la durée d'observation est supérieure à 80 ans ont été retenues pour l'analyse de la variabilité des épisodes pluvieux. Par contre, le nombre moyen de jours de pluies par an a été calculé pour toutes les stations de l'étude pour montrer l'évolution des épisodes pluvieux en fonction de la latitude.

Les figures 149 et 150 montrent une distribution spatiale très inégale du nombre moyen de jours pluvieux des stations du bassin du Diarha. En effet, les épisodes pluvieux sont plus fréquents au sud (Labé, Mali, Koubia et Pita) et à l'ouest (Youkounkoun et Koundara), qu'au nord (Salémata, Oussoukala) et à l'est (Dakately, Neppen Diakha, Kédougou, Bandafassi, Fongolimbi) du bassin du Diarha. Le nombre moyen de jours de pluies par an varie de 100 jours au sud à 81 jours à l'ouest ; et de 55 jours au nord à 61 jours à l'est du bassin. Cette situation est à mettre en rapport avec le massif du Fouta Djallon qui réoriente les flux méridionaux car tout le bassin amont se situe en contrebas du versant sous le vent.

L'analyse de la figure 151 montre que durant la sécheresse de 1968-1993, le nombre des épisodes pluvieux des stations retenues a baissé de l'ordre 4% (station de Kédougou) à 8% (station de Labé). Par contre, à partir de 1994, marquant le début de la nouvelle séquence humide, on note une hausse du nombre de jours de pluies. En effet, ce dernier est passé de 68.4 jours à 73.5 jours à Kédougou ; et de 104.7 à 112 jours à Labé respectivement durant et après la sécheresse. On remarque également que le nombre moyen d'épisodes pluvieux après sécheresse à la station de Kédougou est même supérieure à la situation d'avant rupture (Fig.151).

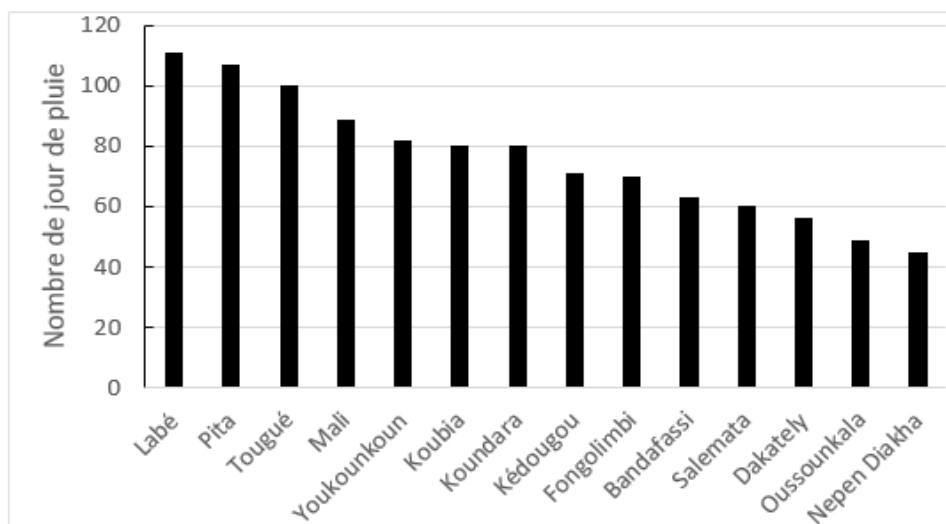


Figure 149. Nombre moyen de jours de pluies par an des stations de l'étude.

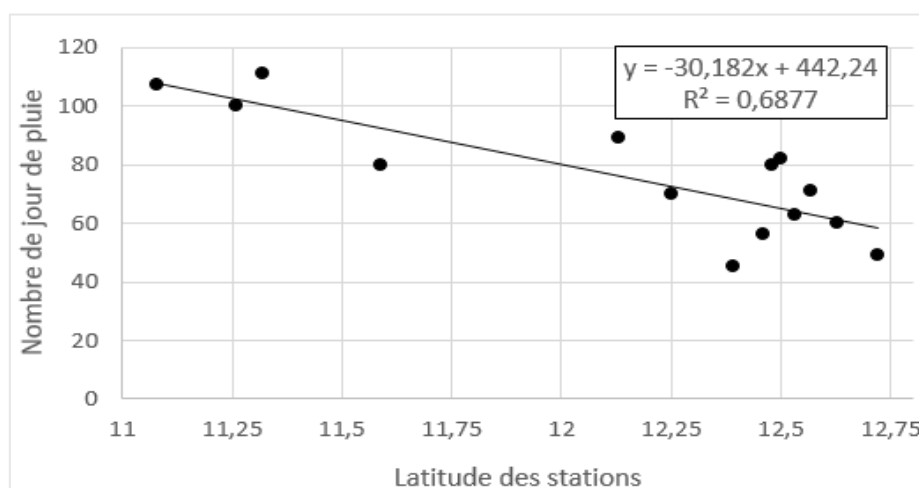


Figure 150. Evolution du nombre de jours de pluies en fonction de la latitude.

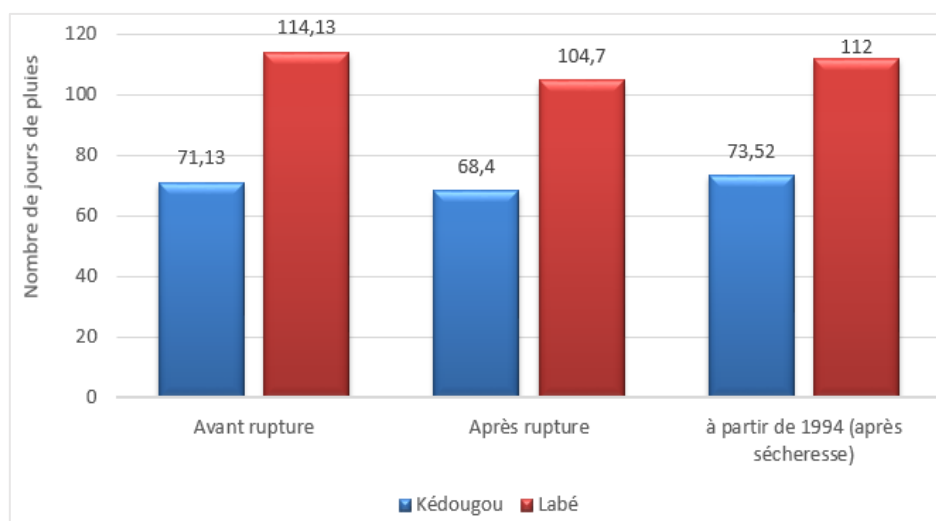


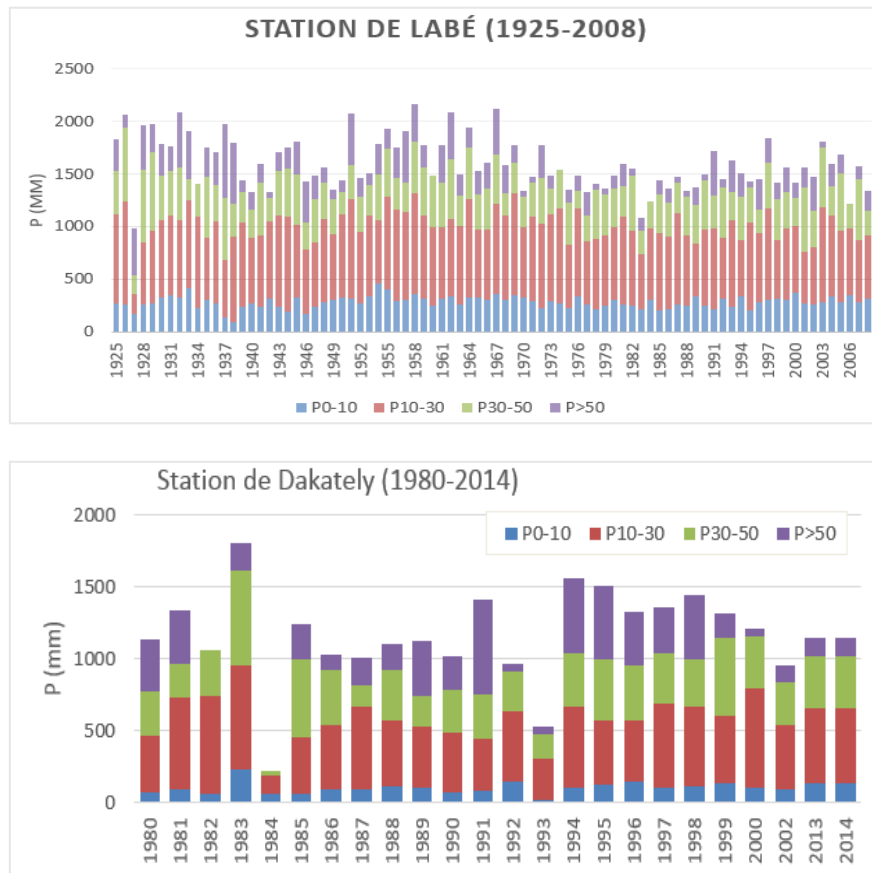
Figure 151. Variation du nombre de jours de pluies de part et d'autre de la date de rupture dans les séries pluviométriques annuelles.

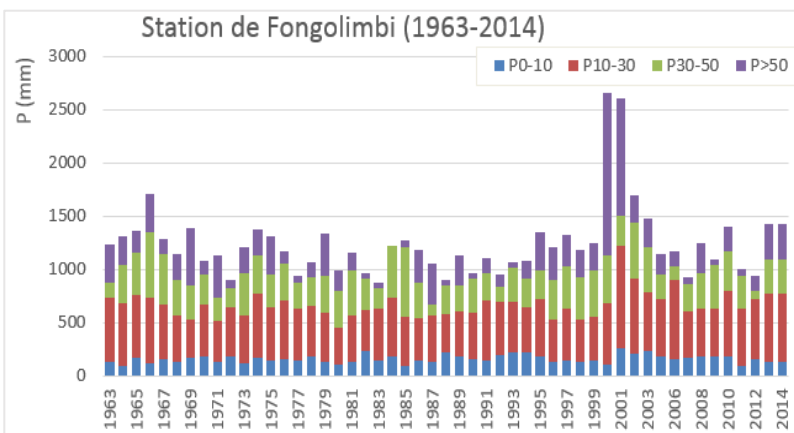
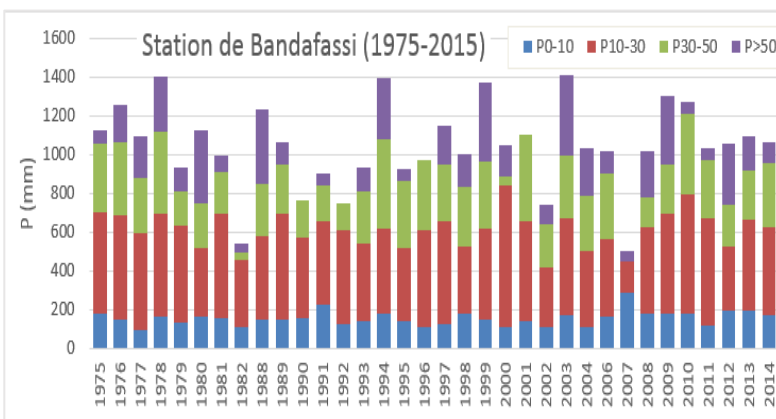
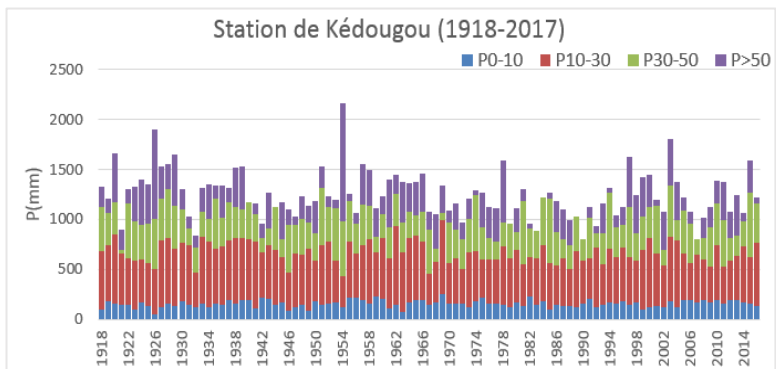
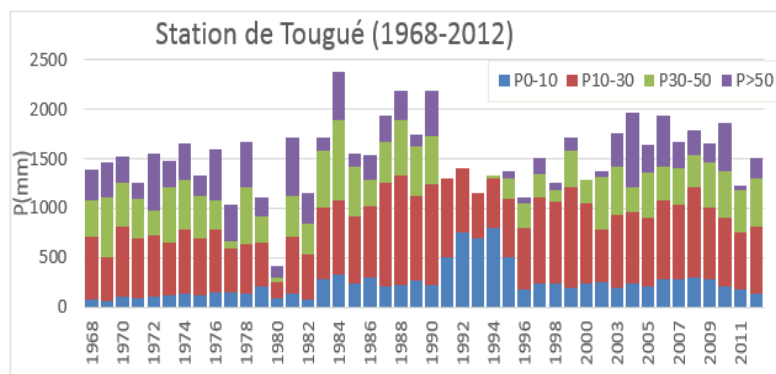
IV.3.10.1.2. Etude des fractions pluviométriques journalières

L'étude des précipitations annuelles et mensuelles a clairement montré la diminution des totaux pluviométriques durant la sécheresse, sans toutefois décrire le phénomène en recherchant les paramètres qui ont varié de façon significative. Dans cette étude, l'influence de la sécheresse sur les pluies journalières a été abordée par l'étude des fractions pluviométriques journalières (Albergel J., 1986 ; Dacosta H., 1989 ; Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., *et al.* 2010 ; Bodian A., Dacosta H., et Dezetter A., 2011). La méthode consiste à répartir le total annuel en quatre fractions :

- $F1=P0-10$, somme des précipitations journalières comprises entre 0 et 10mm ;
- $F2=P10-30$, somme des précipitations journalières comprises entre 10 et 30mm ;
- $F3=P30-50$, somme des précipitations journalières comprises entre 30 et 50mm et
- $F4=P>50$, somme des précipitations supérieures à 50mm.

D'après les histogrammes empilés des fractions pluviométriques, F1, F2 et F3 sont régulièrement enregistrées. Par contre, F4 est inexistante certaines années : 1934, 1960, 1975, 1984, et 2006 à Labé, par exemple (Fig.152).





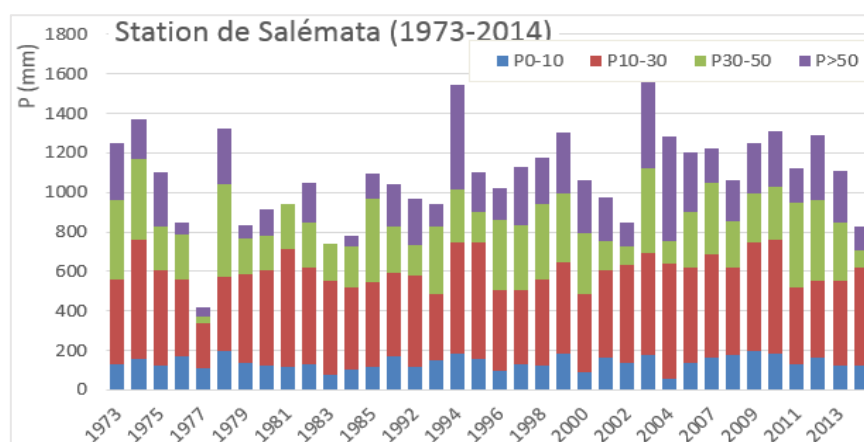


Figure 152. Variations des fractions pluviométriques journalières de quelques stations.

Le tableau 53 montre que l'essentiel des précipitations journalières du bassin du Diarha est compris entre 10 et 50mm. F2 contribue en moyenne de 43% aux apports pluviométriques annuels dans le bassin. Cette fraction est suivie de F3 (26%) et F4 (18%). En revanche F1 contribue plus que F4 aux stations de Labé, Pita, et Youkounkoun. Cette situation est à mettre en rapport avec l'étalement de la saison des pluies en domaine guinéen qui s'accompagne également d'une diminution des intensités de pluies (Rochette C., 1974).

L'examen des coefficients de variation montre que c'est surtout les fractions F3 (P30-50mm) et F4 (P>50mm), considérées comme de grosses pluies, qui ont plus variées dans toutes les stations. Elles expliquent, en moyenne, 68% de la variance totale des pluies annuelles. F4, pour elle seule, explique en moyenne, pour l'ensemble des stations, 43% de la variation de la pluviométrie annuelle. Ces résultats sont en accord avec ceux présentés pour le Burkina Faso par Albergel J., (1986) ; le bassin de N'Zi Bandama en Côte d'Ivoire par Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., *et al.* (2010) ; le fleuve Sénégal par Bodian A., Dacosta H., et Dezetter A., (2011) ; et pour le bassin du Sine Saloum par Manga A.V., (2012).

Tableau 53. Quelques paramètres statistiques des fractions pluviométriques des stations de l'étude.

Station	P0-10	P10-30	P30-50	P>50
Tougé				
Apport moyen (mm)	245	678	356	252
Ecart Type (mm)	168	184	186	184
Coefficient de variation	0.68	0.27	0.52	0.73
Labé				
Apport moyen (mm)	280	711	372	208
Ecart Type (mm)	60	167	135	147
Coefficient de variation	0.21	0.24	0.36	0.70
Pita				
Apport moyen (mm)	314	720	302	131
Ecart Type (mm)	188	231	233	105
Coefficient de variation	0.60	0.32	0.77	0.80

Mali				
Apport moyen (mm)	167	613	476	334
Ecart Type (mm)	54	173	195	164
Coefficient de variation	0.32	0.28	0.41	0.49
Koubia				
Apport moyen (mm)	186	547	378	287
Ecart Type (mm)	64	122	175	141
Coefficient de variation	0.34	0.22	0.46	0.49
Youkounkoun				
Apport moyen (mm)	192	590	326	185
Ecart Type (mm)	42	104	113	162
Coefficient de variation	0.22	0.18	0.35	0.88
Koundara				
Apport moyen (mm)	187	576	312	192
Ecart Type (mm)	41	105	116	157
Coefficient de variation	0.22	0.18	0.37	0.82
Salemata				
Apport moyen (mm)	139	461	269	217
Ecart Type (mm)	34	81	112	132
Coefficient de variation	0.24	0.18	0.42	0.61
Oussoukalla				
Apport moyen (mm)	101	431	265	161
Ecart Type (mm)	49	78	111	126
Coefficient de variation	0.48	0.18	0.42	0.78
Kédougou				
Apport moyen (mm)	156	515	333	248
Ecart Type (mm)	36	104	128	184
Coefficient de variation	0.23	0.20	0.38	0.74
Bandafassi				
Apport moyen (mm)	154	458	269	166
Ecart Type (mm)	38	102	111	128
Coefficient de variation	0.24	0.22	0.41	0.77
Fongolimbi				
Apport moyen (mm)	158	507	324	251
Ecart Type (mm)	38	111	116	252
Coefficient de variation	0.24	0.22	0.36	1.01
Dakately				
Apport moyen (mm)	103	486	335	241
Ecart Type (mm)	42	133	129	178
Coefficient de variation	0.41	0.27	0.38	0.74
Nepen Diakha				
Apport moyen (mm)	79	429	269	190
Ecart Type (mm)	39	154	116	120
Coefficient de variation	0.49	0.36	0.43	0.63
Apport moyen par fraction %	13%	43%	26%	18%
Contribution à la variance totale %	19%	14%	25%	43%

L'analyse de l'évolution des fractions pluviométriques de part et d'autre des dates de rupture, effectuée à partir des stations longue durée (Kédougou et Labé) montre que la grande sécheresse des années 1968-1993 a surtout affecté les pluies journalières extrêmes par une baisse comprise

entre 6,2% et 24,8% à Kédougou, et entre 11,9% et 36,4% à Labé, respectivement pour les P30-50mm et P>50mm. Cependant, à partir de 1994, on assiste, à la station de Kédougou, à une hausse de 4,5% (P30-50mm) et 0,2% (P>50mm) ; tandis qu'à Labé ce sont surtout les pluies journalières de faibles intensités (P0-10mm) qui ont subi une hausse (Fig.153).

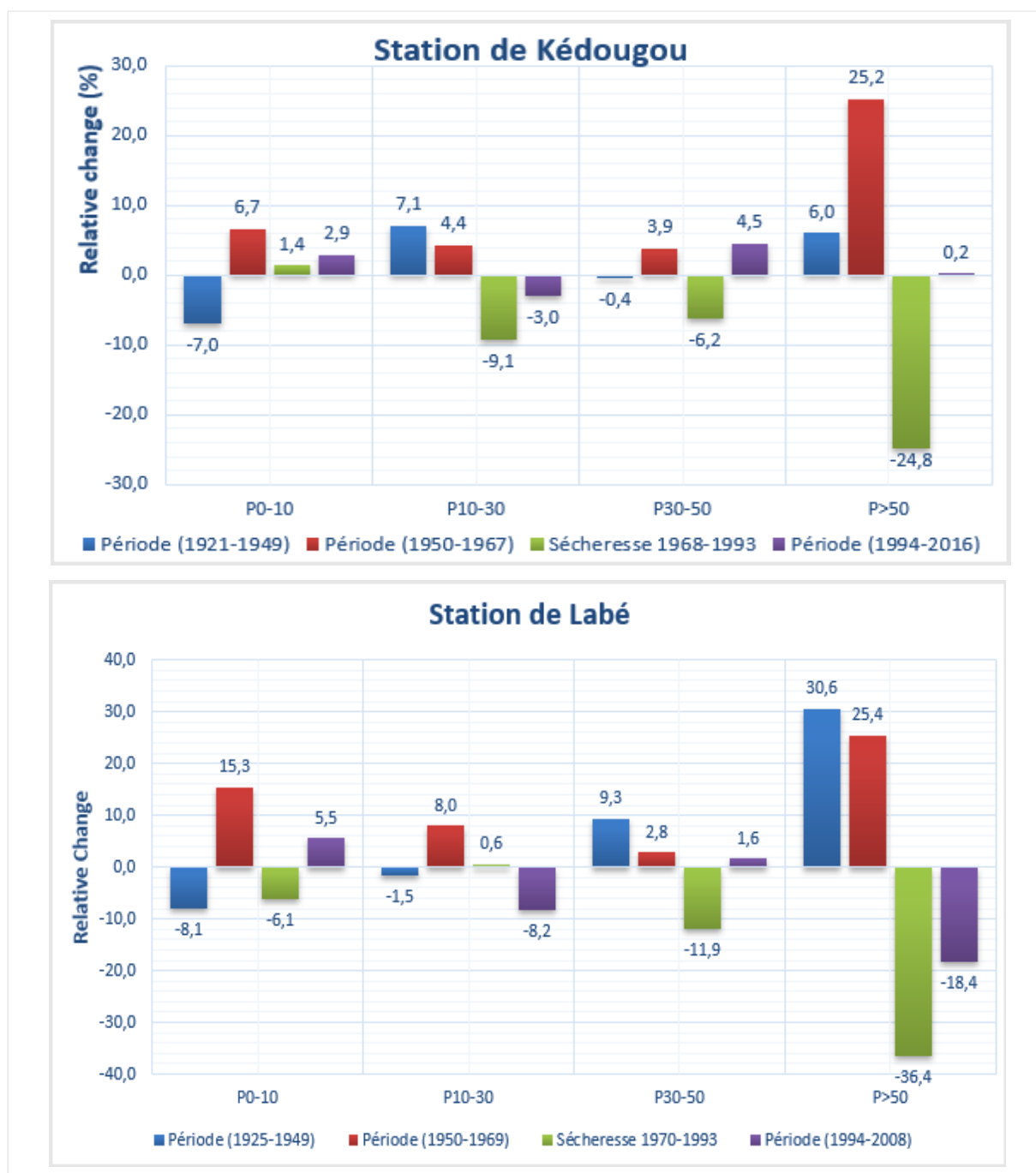


Figure 153. Changements relatifs des fractions pluviométriques journalières des stations de Kédougou et de Labé

IV.3.10.2. Analyse fréquentielle des pluies journalières

L'étude fréquentielle des hauteurs de précipitations journalières a consisté, après classement des pluies journalières, à rechercher pour chaque station l'ajustement d'une loi de distribution. Trois lois tronquées, Pearson III (Gamma incomplète), Goodrich (exponentielle généralisée) et Galton (gausso-logarithmique) ont été ajustées aux échantillons de pluies journalières. La loi de Pearson III tronquée s'est le mieux ajustée à l'ensemble des stations. Sa fonction de répartition est la suivante :

$$F_1(x) = F_1(0) \frac{1}{\Gamma \gamma} \int_x^\infty \left(\frac{x}{s}\right)^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{s}} \left(\frac{d}{s}\right)$$

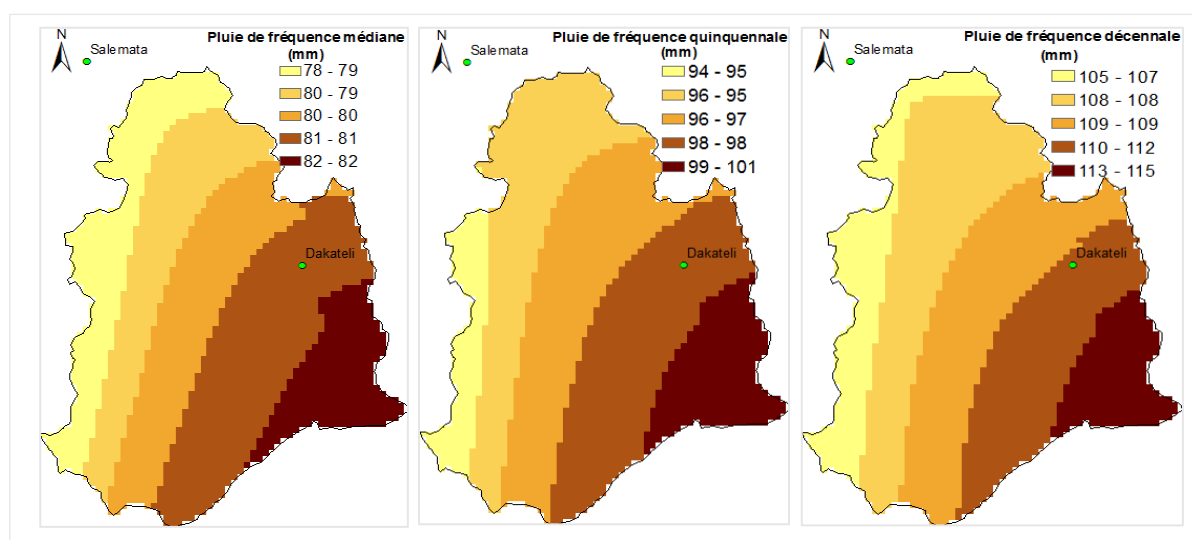
Où :

- $F_1(x)$ est la probabilité pour que la valeur de la variable soit supérieure ou égale à x .
- $F_1(0)$ est la probabilité pour que la valeur de la variable ne soit pas nulle, paramètre de tronquage.
- γ , paramètre de forme, positif, sans dimension.
- S , paramètre d'échelle, positif, s'exprimant dans la même unité que x , ici comme la précipitation en mm ;
- $\Gamma \gamma$, est la fonction gamma complète (Eulérienne de seconde espèce).
- L'ensemble des précipitations journalières est pris en compte, d'où le traitement n valeurs x_i , ($x_i \leq x_{n+1} = N * M$), N étant le nombre d'années d'observations et M le nombre moyen annuel de jours de pluies.
- $F_1(0)$ est en théorie égal à $\frac{M}{365.25}$, rapport du nombre moyen de jours de pluie par an au nombre de jours de l'année, mais on préfère calculer $F_1(0)$ avec M nombre moyen théorique de jours de pluie dans l'année obtenu par la méthode des moments (ce qui exclut l'imprécision du nombre de jours de pluie inférieure à 0,1 mm non comptabilisés). Les résultats de l'ajustement de la loi de Pearson III tronquée aux pluies journalières de 14 postes bien répartis dans le bassin sont consignés dans le tableau 54 ci-dessous :

Tableau 54. Bassin versant du Diarha – Statistiques des pluies journalières fréquentielles (mm).

Stations	Latitude	Durée observée (an)	Période de retour					
			2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Labé	11.32	87	79	93	103	114	128	138
Mali	12.13	16	90	106	118	130	145	157
Koubia	11.59	19	113	147	177	211	263	307
Pita	11.08	22	64	77	86	96	109	118
Tougué	11.26	46	84	100	112	124	141	153
Koundara	12.48	44	73	85	94	103	116	125
Youkounkoun	12.50	41	72	84	93	103	115	123
Nepen Diakha	12.39	22	81	102	118	135	157	174
Oussoukalla	12.72	16	74	89	99	109	124	134
Bandafassi	12.53	34	78	94	105	118	134	146
Salemata	12.63	36	80	96	108	120	135	147
Dakateli	12.46	25	81	97	109	122	138	150
Fongolimbi	12.25	52	77	92	104	115	130	141
Kédougou	12.57	100	86	102	114	125	142	154

Une restitution cartographique a été faite permettant de visualiser la répartition des quantiles de précipitations journalières sur l'ensemble du bassin du Diarha. La figure 154 montre la répartition spatiale des quantiles de pluies journalières suivant leur récurrence. L'examen du tableau 54 et de la figure 154 montre que pour un même temps de retour, les quantiles augmentent généralement suivant un gradient NNW-SSE. Nous avons pensé à l'étalement de la saison des pluies à l'ouest et au sud du bassin comme facteur explicatif de ces différences. Abondant dans le même sens, Rochette C., (1974) considère qu'en domaine climatique guinéen, la faiblesse des intensités de pluies est en rapport direct avec l'étalement de la saison des pluies. Mais, la « dimension de l'échantillon c'est-à-dire le faible nombre d'années d'observations des jeunes stations (Brunet-Moret Y., 1969) » pourrait y être pour quelque chose.



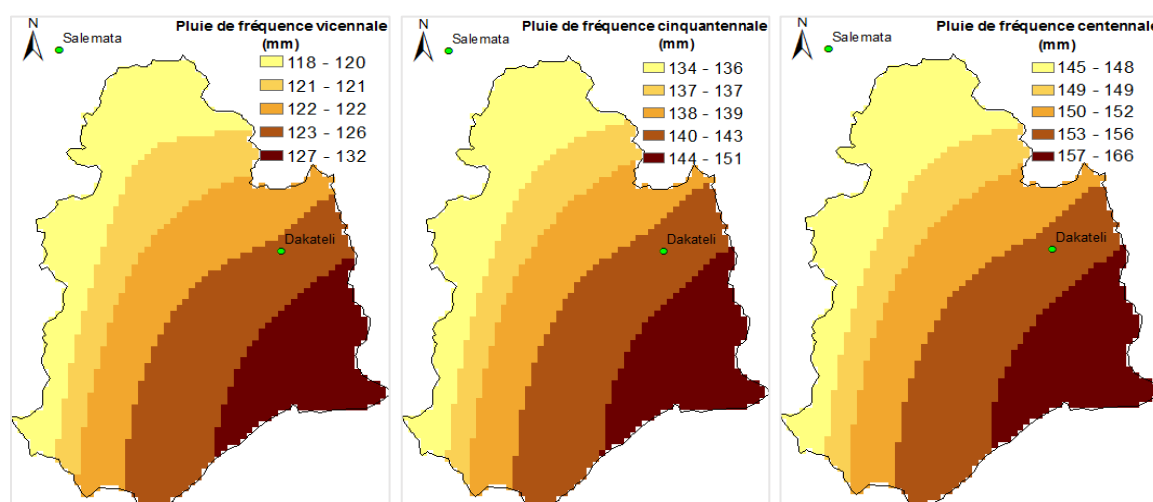


Figure 154. Bassin du Diarha - Carte de répartition spatiale des pluies journalières fréquentielles.

Conclusion

Le climat du bassin du Diarha est marqué par une variabilité spatiotemporelle des précipitations caractéristique du domaine tropical. On note, durant la période 1921-2016, l'existence de quatre périodes bien distinctes qui confirme d'une part, la tendance à la hausse de la pluviosité entre 1950 et 1967 – d'autre part, sa baisse entre 1968 et 1993 – la période avant 1950 et depuis le milieu des années 90 se ressemblent – entourant la moyenne par une forte variabilité interannuelle. La reprise des pluies, amorcée depuis le milieu des années 90, s'est accentuée au cours de la décennie 2001-2010, qui marque un retour des conditions pluviométriques à leur niveau moyen. Cette reprise des pluies est même au-dessus de la moyenne de long terme au niveau des sous bassins de Mbéma, Bilèle, et Gokodou, au nord et au sud-ouest du bassin du Diarha. Les plus faibles pourcentages de reprise des pluies sont notés dans les sous bassins de Fangama (97%), Dakateli et de Diouguel (95%), à l'est du Diarha. Cette nouvelle tendance des pluies est associée à une recrudescence des pluies journalières extrêmes (P30 et 50mm et P>50mm), en domaine sud-soudanien et des pluies journalières de faibles intensités (P0-10mm), en domaine climatique guinéen. Ces résultats sont en cohérence avec les conclusions d'autres études menées en Afrique de l'Ouest :

- Déjà en 2009, LEBEL T. et ALI A. notaient que depuis la fin des années 1990 les conditions étaient plus humides dans l'Est du Sahel et que la sécheresse reculait légèrement dans le Sahel central. Le Sahel occidental, en revanche, connaissait toujours des conditions sèches.

- En travaillant sur les fortes pluies au Sahel, SARR B. et LONA I. (2009) ont observé en 2007 une hausse du nombre de jours de pluies supérieures à 50 mm par rapport à la moyenne 1951-2006.
- Les travaux de DESCROIX L., DIONGUE NIANG A., PANTHOU G., *et al* (2015) révèlent qu'en Sénégambie la reprise des pluies apparaît plus précoce (début des années 1990), plus forte et plus stable que dans le bassin du Niger moyen (où elle se manifeste à la fin des années 1990). Cette évolution s'est accompagnée de pluies journalières « extrêmes » plus fréquentes.

Toutefois, même si on identifie une nette amélioration de la pluviométrie du bassin sur la période récente (1994-2016), les quantités de pluies annuelles recueillies restent inférieures à celles d'avant 1967 et sont marquées par une forte irrégularité interannuelle.

CHAPITRE V. ÉTUDE HYDROLOGIQUE DU DIARHA ET DES BAS- FONDS DE SES SOUS BASSINS

Introduction

Selon Demangeot J. (2009), l'écoulement est fonction de « ce qui reste après évaporation, de la géométrie et de l'état de la surface réceptrice des pluies, de la nature du sous-sol et des interventions de l'homme ». Le débit moyen interannuel permet d'évaluer la ressource potentielle tandis que la connaissance des variations saisonnières et interannuelles permet d'estimer les défaillances qui peuvent survenir dans les conditions naturelles et d'évaluer les volumes de réserves nécessaires pour les réduire.

Ce chapitre traite de la variabilité des écoulements du bassin du Diarha analysée au pas de temps annuel, interannuelle, mensuelle. Le pas de temps journalier est pris en compte par l'analyse des crues et des étiages par les débits caractéristiques. D'une manière globale, les écoulements du Diarha sont rythmés par la saison des pluies qui démarque deux périodes bien distinctes : la période de crues avec la saison des pluies et celle des étiages avec la saison sèche.

V.1. Données hydrométriques

Le bassin du Diarha a une seule station hydrométrique qui a été mise en service en mai 1972. Cette station est équipée d'une batterie d'échelles limnimétriques de 0 à 6 m fixées sur une pile du pont en rive gauche, et d'une batterie de 6 à 8 m plaquée sur le mur arrière du pont. Ces deux batteries permettent la lecture des hauteurs d'eau en périodes de crue et d'étiage. La station est aussi équipée d'un limnigraphe AOTT type X, à axe horizontal et à rotation mensuelle avec réduction au 1/20^{ème} installé le 8 juin 1974 sur le pont. Le 18 juillet 1991, le rattachement de l'échelle a été fait sur le milieu du pont coté à 56.1 m IGN.

Photo 5. Station hydrométrique du Diarha-pont



Cliché THIAW, Décembre 2019

Le Diarha a été régulièrement observé entre 1972 et 1992, avec seulement deux années (1973 et 1974) sans observation. Mais, de 1993 à 1997 aucun jaugeage n'a été effectué. Des mesures régulières n'ont repris qu'à partir de 1998 jusqu'aux années 2000. Au total, la station compte 122 jaugeages et 14 étalonnages depuis sa date de création (Fig.155). Le tableau 55 présente l'inventaire des cotes et des débits moyens journaliers du Diarha.

Tableau 55. Bassin du Diarha - Inventaire des cotes et débits de 1961 à 2012

Id Station	Description	Date Début	Date Fin	% lacunes	Durée
Diarha-Pont	Débits moyens journaliers	8/7/1972	8/7/2004	26	23.7
	Débits homogénéisés	1/1/1961	12/31/2012	0	52
	Cotes Principal	8/7/1972	8/7/2004	26	23.7

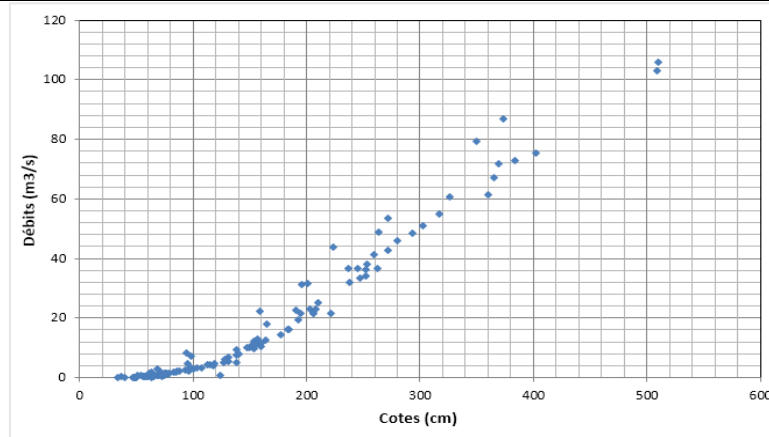


Figure 155. Courbe d'étalonnage du Diarha au pont routier

V.2. Ecoulements annuels et interannuels

Les modules annuels du Diarha sont illustrés sur la figure 156 et les caractéristiques statistiques dans le tableau 56. D'une manière générale, on note trois séquences de l'évolution des modules :

- de 1961 à 1967 : phase à forte hydraulicité (excédentaire) durant laquelle les modules moyens excèdent de 34% le module interannuel ($7.3 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- De 1968 à 1993 : phase à faible hydraulicité (déficitaire) avec une baisse de 18% des écoulements du Diarha. Ce déficit est à mettre en rapport avec la longue sécheresse qui a frappé le bassin du Diarha sur cette période, occasionnant une baisse de 11% des précipitations.

- Enfin, de 1994 à 2012, une reprise des écoulements se manifeste, mais avec une grande irrégularité interannuelle, marquée notamment par une forte sécheresse en 2002. Durant cette période, les modules moyens excèdent de 12% le module interannuel ($7,3\text{m}^3/\text{s}$), mais sans retour à l'hydraulicité d'avant la sécheresse (Tab.56).

Tableau 56. Modules annuels moyens, écart-types et coefficient de variation à la station du Diarha.

Paramètres statistiques	Période
	1961-2012
Q moyen m^3/s	7,3
Ecart type m^3/s	2,86
CV	0,39
	1961-1967
Q moyen m^3/s	9,8
Ecart type m^3/s	2,4
CV	0,24
	1968-1993
Q moyen m^3/s	6,0
Ecart type m^3/s	2,52
CV	0,42
	1994-2012
Q moyen m^3/s	8,2
Ecart type m^3/s	2,57
CV	0,31

L'observation de la figure 156 montre que le module maximum (DMAX) $13,8\text{ m}^3/\text{s}$ de la série chronologique est observé en 1974-75 et le module minimum (DMIN) $2,2\text{ m}^3/\text{s}$ l'est en 1984-85. L'année hydrologique 2001-2002 vient rappeler que cette sécheresse n'est peut-être pas terminée. Le Diarha a observé son module le plus faible ($3,3\text{ m}^3/\text{s}$) de la série chronologique durant cette année, après celui de 1984-1985 qui était de $2,2\text{ m}^3/\text{s}$.

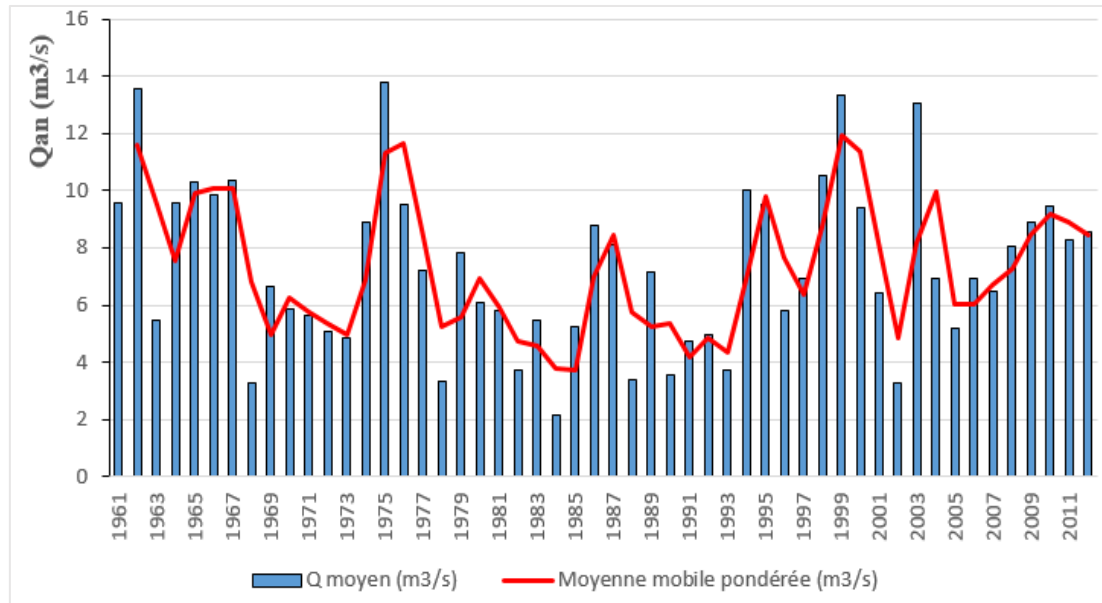


Figure 156. Variations des modules (m^3/s) du Diarha au pont routier de 1961 à 2012.

L'analyse de la variabilité annuelle des écoulements du Diarha s'est faite également avec l'Indice Standardisé des Débits (ISD) qui s'obtient à partir de la formule suivante :

$$ISD = \frac{Q (\text{m}^3/\text{s}) - \bar{Q} (\text{m}^3/\text{s})}{E.T(\text{m}^3/\text{s})}$$

Avec : $Q (\text{m}^3/\text{s})$: Débit moyen d'une année ; $\bar{Q} (\text{m}^3/\text{s})$: module interannuel ; E.T = Ecart-Type de la série.

Cet indice, inspiré de celui des SPI (*Standardized Precipitation index*) a l'avantage de mettre en évidence des années à forte et à faible hydraulité. Le module interannuel d'une série correspond à l'indice nul (0). Les valeurs supérieures à l'unité sont des années à hydraulité excédentaire et celles inférieures, des années à hydraulité déficitaire.

L'examen de la figure 157 montre que le Diarha a, sur ses 52 ans complets, 28 années déficitaires soit 54% et 24 années excédentaires soit 46%. Les années hydrologiques 1961-62, 1974-75, 1998-99 et 2003-04 ont enregistré les plus fortes valeurs d'hydraulité durant la période 1961-2012. L'année hydrologique 1984-85 a enregistré la plus faible valeur d'hydraulité de la série. Cette année est également la plus déficitaire (-37,9%) du point de vue pluviométrique dans tout le bassin du Diarha.

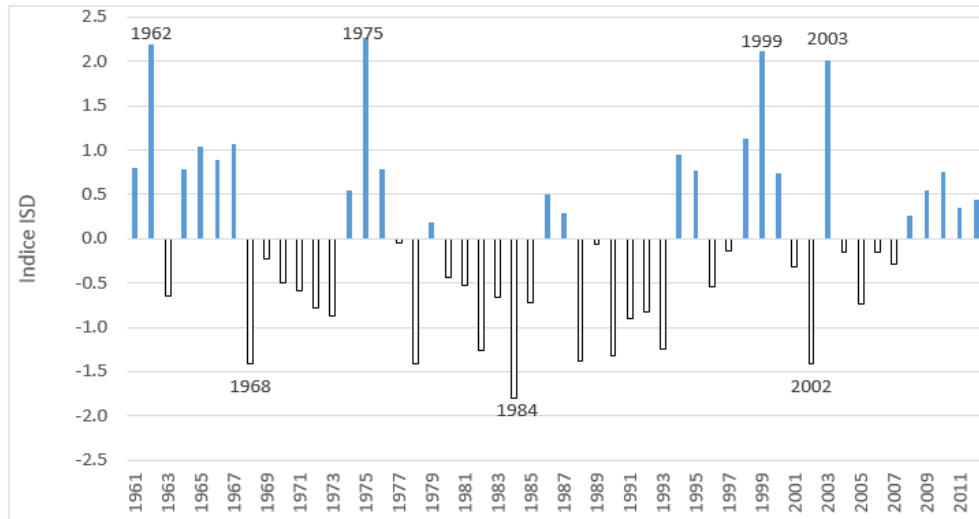


Figure 157. Indices standardisés des débits moyens annuels du Diarha sur la période 1961-2012.

Les débits moyens annuels du Diarha sont largement tributaires des quantités pluviométriques journalières reçues et des débits mensuels qui en résultent. Mais, ils ne représentent pas fidèlement ces derniers. Ils résument certaines informations qui ne peuvent être décelées qu'à travers l'analyse de la variabilité saisonnière (mensuelle) et journalière des débits.

V.3. Répartition mensuelle des écoulements

L'étude de la variabilité saisonnière des débits permet de déterminer le régime hydrologique moyen du cours d'eau. « L'année hydrologique commence le 1^{er} mai et se termine le 30 avril dans le cas du Sénégal » (Dacosta H., 1989). Le tableau 57 dans lequel sont consignés les quantiles des débits moyens mensuels et les Coefficients Mensuels de Débit (CMD) avant et après 1968 l'illustre bien. Le CMD est le rapport entre le débit moyen d'un mois donné et le débit moyen annuel (7,3 m³/s). Selon la classification de Pardé (1968), un CMD supérieur ou égal à 1 correspond à une période de hautes eaux et un CMD inférieur à 1 est assimilé à une période de basses eaux.

L'examen du tableau 57 et de la figure 158 montre que les débits moyens mensuels du Diarha ont sensiblement baissés après 1968. Cette baisse est plus notable durant ses périodes de hautes eaux, avec -10.3 m³/s en août, -11.2 m³/s (septembre) et -8.9 m³/s (octobre). Seul le mois de juillet connaît une légère hausse de 0.5 m³/s. Ces quatre mois concentrent en moyenne 92% des apports du Diarha. Ce déséquilibre dans la répartition des disponibilités en eau impacte

fortement toutes les activités économiques (agriculture, pastoralisme, agroforesterie...) dans le bassin.

Tableau 57. Bassin du Diarha – Débits moyens mensuels (m³/s) avant et après 1968.

Diarha-Pont	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Module (m ³ /s)
Période 1961-2012													
Q moyen (m ³ /s)	0.3	0.6	5.8	22.9	35.8	16.1	3.4	1.2	0.6	0.4	0.3	0.3	7.3
Q minimum	0.0	0.0	0.0	1.5	10.7	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2
Q1 (25%)	0.0	0.4	1.6	12.2	21.4	8.1	2.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	3.9
Q2 (médian)	0.4	0.5	3.5	21.1	30.7	15.3	3.0	1.3	0.8	0.7	0.5	0.5	6.5
Q3 (75%)	0.5	0.6	6.3	29.0	45.7	21.5	4.3	1.8	1.1	0.8	0.6	0.5	9.4
Q maximum	2.2	3.1	55.3	69.1	89.1	46.3	13.7	2.6	1.3	0.9	0.7	1.3	23.8
CMD	0.0	0.1	0.8	3.1	4.9	2.2	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	
Ecart-Type	0.4	0.6	8.5	14.5	17.8	9.9	2.3	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	4.7
Coef. Variation	1.27	1.06	1.47	0.63	0.50	0.62	0.66	0.55	0.76	0.92	0.94	1.00	0.64
Période 1961-1967													
Q moyen (m ³ /s)	0.5	0.8	5.4	31.8	45.4	23.8	5.0	1.9	1.1	0.8	0.7	0.5	9.8
Q minimum	0.0	0.1	0.9	14.9	16.5	9.7	3.7	1.7	1.1	0.8	0.6	0.5	5.4
Q1 (25%)	0.5	0.4	1.6	16.5	38.4	15.1	4.3	1.8	1.1	0.8	0.6	0.5	9.7
Q2 (médian)	0.5	0.5	2.6	26.0	50.7	21.2	4.8	1.9	1.1	0.8	0.6	0.5	9.8
Q3 (75%)	0.5	0.6	9.6	39.9	55.0	29.8	5.3	2.0	1.2	0.8	0.7	0.6	10.3
Q maximum	0.8	2.9	11.6	69.1	64.0	46.3	7.0	2.1	1.2	0.9	0.7	0.6	13.6
CMD	0.05	0.08	0.55	3.23	4.61	2.42	0.50	0.19	0.12	0.08	0.07	0.06	
Ecart-Type	0.2	0.9	4.7	20.0	16.5	12.5	1.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	2.4
Coef. Variation	0.51	1.17	0.87	0.63	0.36	0.52	0.22	0.09	0.05	0.04	0.03	0.03	0.24
Période 1968-2012													
Q moyen (m ³ /s)	0.3	0.6	5.8	21.5	34.2	14.9	3.2	1.1	0.6	0.4	0.3	0.3	6.9
Q minimum	0.0	0.0	0.0	1.5	10.7	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2
Q1 (25%)	0.0	0.3	1.6	11.4	19.9	7.7	1.9	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	5.2
Q2 (médian)	0.0	0.5	3.6	19.6	30.6	13.6	2.6	1.2	0.4	0.1	0.0	0.0	6.5
Q3 (75%)	0.5	0.6	5.9	27.4	40.9	20.6	4.2	1.7	1.0	0.8	0.6	0.5	8.7
Q maximum	2.2	3.1	55.3	52.1	89.1	36.0	13.7	2.6	1.3	0.9	0.7	1.3	13.8
CMD	0.038	0.083	0.844	3.113	4.956	2.160	0.457	0.165	0.081	0.052	0.042	0.038	
Ecart-Type	0.4	0.6	9.0	13.2	17.7	9.0	2.3	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	2.8
Coef. Variation	1.45	1.03	1.54	0.61	0.52	0.61	0.73	0.59	0.86	1.06	1.09	1.17	0.41

Cette concentration est accentuée par la part des apports de septembre qui représentent plus que le quadruple du module annuel ; ce qui démontre le caractère non pondéré du régime hydrologique du Diarha.

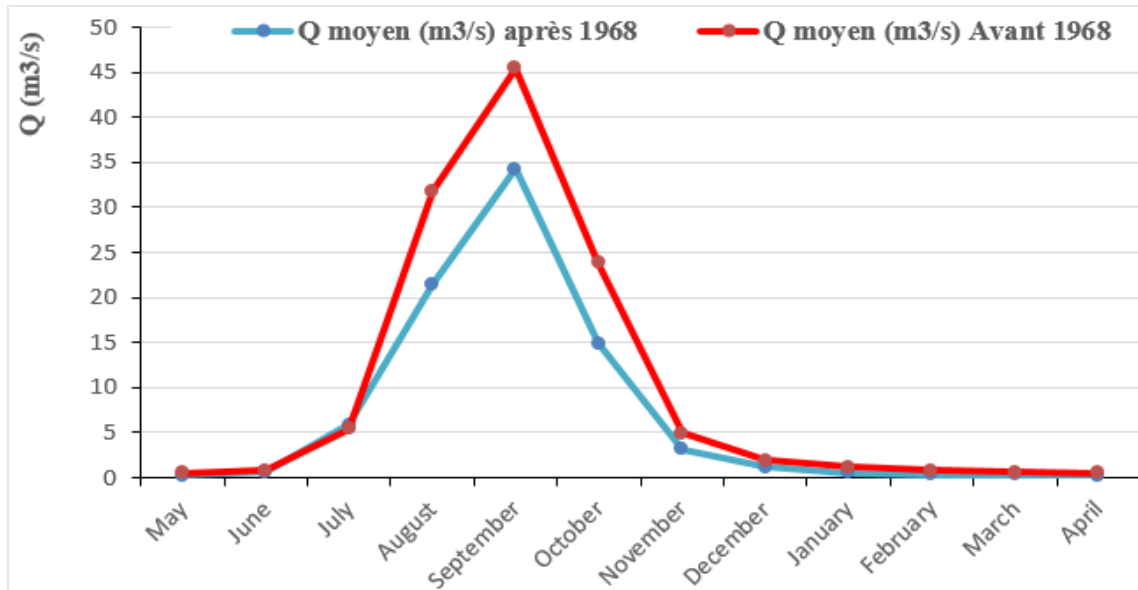


Figure 158. Débits moyens mensuels (m^3/s) du Diarha avant et après 1968.

Septembre apparaît comme le mois de la crue annuelle normale dans le bassin du Diarha pour 71% des cas. La crue est précoce quand elle survient en juillet (2% des cas), et tardive lorsqu'elle est enregistrée en octobre (8% des cas) (Tab.58).

Tableau 58. Fréquences d'apparition mensuelle des débits maximums.

	Débits maximums				Total
Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	
Nombre d'années	1	10	37	4	52
Fréquence (%)	2	19	71	8	100

La période des basses eaux s'étend sur 8 mois (novembre à juin) avec un seul minima en mai ($0,29 \text{ m}^3/\text{s}$). Le régime hydrologique du Diarha est de type tropical de transition (3 à 4 mois de hautes eaux), influencé par le domaine guinéen, mais aussi saisonnier car l'écoulement ne dépend que de l'apport pluvial et des nappes qui soutiennent parfois les débits.

La variation mensuelle des débits moyens du Diarha de 1961 à 2012 se résume en deux grandes phases :

- Une phase de montée des eaux

Elle va de juin à septembre avec des débits qui passent de $0,6$ à $35,8 \text{ m}^3/\text{s}$ soit une évolution brute de $35,2 \text{ m}^3/\text{s}$. De juin à septembre, la hausse des débits correspond à la progression suivante :

- Entre juin et juillet, l'augmentation est de 0,6 à 5,8 m³/s, soit une hausse de 5,2 m³/s. cette période se caractérise par une faible montée des eaux liée sans doute au début d'installation de la saison pluvieuse dans le bassin ;
- Entre juillet et août, les débits passent de 5,8 m³/s à 22,9 m³/s. L'accroissement est certes brutal mais, les débits restent modestes à cause du délai de remplissage des nappes et de l'organisation du drainage liée à l'installation progressive de la saison des pluies.
- De juillet à septembre, les débits passent de 5,8 m³/s à 35,8 m³/s. Cette montée brutale des eaux s'explique par l'importance des lames d'eau précipitées durant ces mois qui représentent en moyenne 72% des apports pluviométriques annuels. Cette période correspond à la saturation de l'atmosphère et des sols, et du temps de propagation de l'onde de crue.

- Une phase de décrue

Cette phase s'annonce dès le mois d'octobre. Entre septembre et octobre les débits passent de 35,8 m³/s à 16,1 m³/s. En l'espace d'un mois, les débits ont chuté brutalement. Ceci est fortement lié au retrait progressif du flux de mousson qui s'accompagne d'une diminution des apports pluviométriques. Cette période correspond à la phase de ruissellement directe de décrue qui assure au mois d'octobre un écoulement important car il est un mois de hautes eaux (CMD égal à 2,2). La phase de ruissellement directe de décrue dépend à la fois du cadre morphostructurale du bassin et de l'état de remplissage des réservoirs.

D'octobre à novembre les débits passent de 16,1 m³/s à 3,4 m³/s. Cette période correspond à la phase de ressuyage des sols.

À partir de décembre, le Diarha entre dans un régime non influencé. Les débits s'amenuisent de plus en plus au cours des mois et s'annulent à partir de mars, ce qui confirme les faibles possibilités aquifères du bassin, révélées par l'étude géologique, hydrogéologique et pédologique. Cet arrêt de l'écoulement, lié à une mauvaise recharge des nappes du fait de leur faible perméabilité, pose le problème des défaillances dans la prévision et la gestion des eaux du bassin du Diarha. Une étude statistique de la période sans écoulement permettrait d'en mesurer l'importance et les risques.

V.4. Débits Caractéristiques de Crue et d'Étiage

Les débits caractéristiques de crue et d'étiage illustrent mieux la forte variabilité des débits journaliers et la précarité des disponibilités des ressources en eau dans le bassin du Diarha. Les débits sont classés dans l'ordre décroissant. Au sixième mois de l'année hydrologique, les débits maximums de crues (DMAX) passent de 97.9 m³/s à 0.8 m³/s ; Au neuvième mois, le débit est inférieur à 0.4 m³/s. Cela veut dire que 3 mois durant, le bassin est dans une situation de précarité absolue. Si on tient compte du débit écologique, on peut considérer qu'à la médiane (6 mois), la situation des ressources en eau du Diarha devient critique. En toute logique, comme cela apparaît sur la figure 159, passer la médiane, le Diarha est dans l'impossibilité d'assurer les besoins en eaux des populations riveraines.

Les ressources en eau du Diarha sont très mal réparties à l'échelle saisonnière. En effet, entre juin et décembre, le Diarha écoule 98% de ses disponibilités en eau de surface au moment où la pression sur ses ressources est quasi nulle, c'est-à-dire la saison des pluies et la fin de celle-ci. Entre janvier et mai, il ne reste plus que 2% de disponibilités face à des besoins amplifiés par la saison sèche. Ces faibles apports du cours d'eau interdisent toutes activités de type agricole ou pastoral. Les bas-fonds du bassin, restent alors les seules zones de concentration appréciable des ressources en eau de surface. Dès lors, une meilleure connaissance de leur capacité de stockage s'avère cruciale – pour la maîtrise des ressources en eau – c'est-à-dire la répartition optimale des quantités écoulées sur les douze mois de l'année.

Tableau 59. Débits caractéristiques du Diarha au pont routier.

	DMAX	DCC_10j	DC1	DC3	Médiane	DC9	DCE_20j	DCE_10j	DMIN
Jour -->	1	10	30.5	91.5	183	274.5	345	355	365
Moyenne	97.9	51.5	28.0	6.4	0.8	0.3	0.2	0.2	0.2
Minimum	37.0	15.0	1.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Q1 (25%)	69.9	33.3	19.2	3.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Q2 (médian)	92.7	45.0	26.8	5.9	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Q3 (75%)	128.7	68.7	35.9	7.9	1.1	0.6	0.4	0.4	0.4
Q4 (maximum)	185.0	124.5	65.0	21.4	2.0	0.8	0.6	0.5	0.5

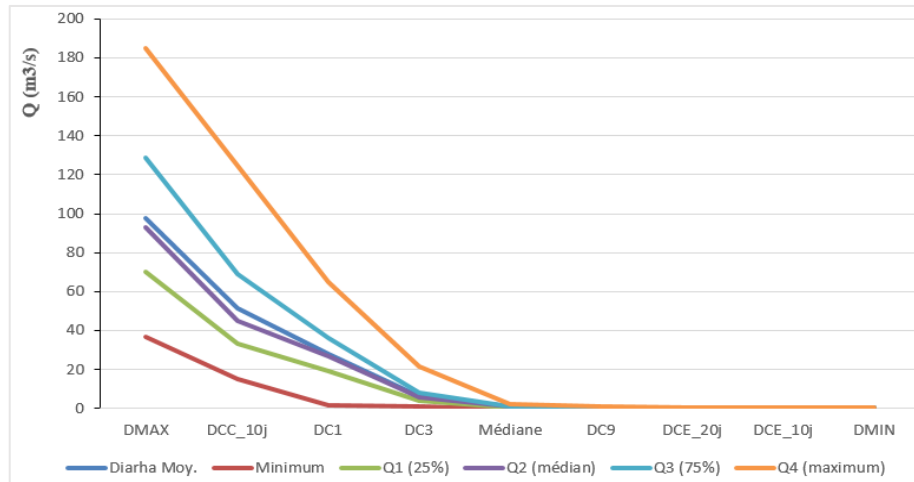


Figure 159. Débits caractéristiques de crues et d'étiages du Diarha

V.5. Analyse fréquentielle des écoulements

L'analyse fréquentielle des écoulements du Diarha a porté sur les modules annuels et les débits maxima de crue. Des quantiles obtenus sur les modules annuels, on déduira les lames et volumes d'eau écoulés pour chaque récurrence ou période de retour.

V.5.1. Analyse des modules moyens annuels

Les deux séries de modules, de 24 années (observées) et 52 années (étendues) ont été traitées. Un ajustement de 11 lois statistiques (Brunet-Moret Y., 1969) a été réalisé. Les débits annuels récurrentiels, de la centennale sèche à la centennale humide, sont consignés dans le tableau 60. Pour la série de 24 ans, en année médiane, le module est $6.13 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour la série étendue, elle passe à $7.03 \text{ m}^3/\text{s}$, ceci correspond respectivement à $193,3.10^6 \text{ m}^3$ et $221,6.10^6 \text{ m}^3$.

La cinquantennale humide a été atteinte en 1961-62, 1974-75, 1998-99 et 2003-04. L'année hydrologique 2001-2002, la plus sèche ($3.3 \text{ m}^3/\text{s}$) après celle de 1984-85, est très proche de la vicennale sèche ($3.22 \text{ m}^3/\text{s}$) (Tab.60).

Tableau 60. Modules annuels récurrentiels (m^3/s) à Diarha-pont.

	Récurrences sèches					Médiane	Récurrences humides				
Fréquence	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Récurrence (années)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100
Q Diarha (24 ans)	2.21	2.35	2.69	3.13	3.90	6.13	9.32	11.34	13.16	15.38	16.94
Q Diarha (52 ans)	2.36	2.65	3.22	3.86	4.80	7.03	9.67	11.15	12.41	13.85	14.83

Tableau 61. Volumes annuels récurrentiels (10^6 m^3) à Diarha-pont.

	Récurrences sèches					Médiane	Récurrences humides				
Fréquence	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Récurrence (années)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100
Q Diarha (24 ans)	69.7	74.1	84.8	98.7	122.9	193.3	293.9	357.6	415.0	485.0	534.2
Q Diarha (52 ans)	74.4	83.5	101.5	121.7	151.3	221.6	304.9	351.6	391.3	436.7	467.6

V.5.2. Analyse statistique des débits maxima de crues

L'objectif de cette étude est de trouver un modèle fréquentiel qui s'ajuste le mieux aux débits maxima de crues du bassin du Diarha. Pour cela, 11 lois intégrées dans le logiciel Hydraccess (Vauchel P., 2004) ont été testées. Le choix des lois est basé sur le test « A » de Brunet-Moret Y. (1969) considérant que, pour les valeurs médianes, toutes les lois donnent des valeurs fréquentielles peu différentes et que ce sont les valeurs extrêmes (les plus faibles ou plus fortes) qu'il importe d'estimer avec le plus de précision. Le test « A » calcule l'écart entre la distribution théorique des lois et les valeurs extrêmes, la meilleure loi étant celle qui a le plus faible écart.

Dans le tableau 62 sont consignés les débits de crues maximales du Diarha, de la centennale sèche à la centennale humide. Le coefficient K3, rapport entre les débits décennaux humide et sec, montre que les crues sont non pondérées et donc très variables d'une année à l'autre. La figure 160 donne la représentation graphique de l'ajustement de la loi de Goodrich aux débits de crues maximales journalières du Diarha.

Tableau 62. Bassin du Diarha - Quantiles des débits maxima journaliers fréquents des crues.

	Récurrence sèche						Médiane	Récurrence humide						K3
Fréquence	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,33	0,5	0,67	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	
Récurrence (année)	100	50	20	10	5	3	2	3	5	10	20	50	100	
Qmax Diarha (24 ans)	41,3	42,5	45,4	49,5	57,0	66,7	80,0	96,5	115,2	138,2	159,5	185,8	204,6	2,79
Qmax Diarha (52 ans)	37,3	39,3	43,8	49,9	60,1	72,9	89,4	109,2	130,8	156,7	180,0	208,2	228,0	3,14

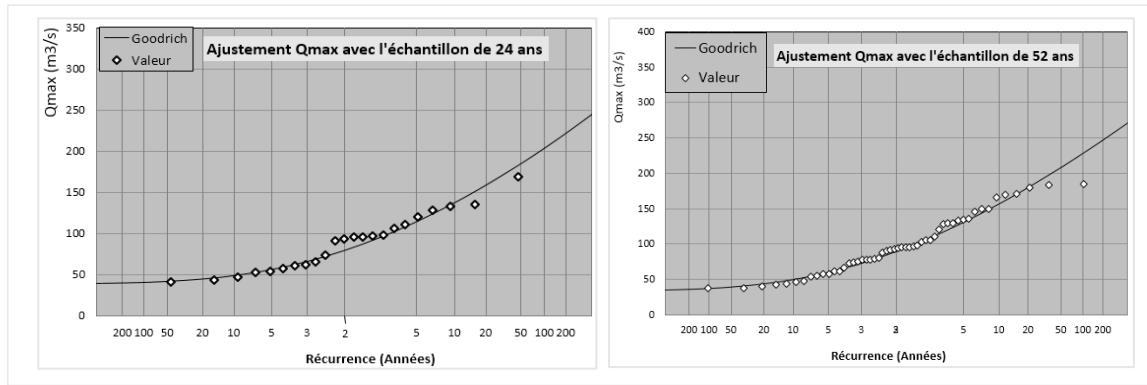


Figure 160. Bassin du Diarha - Distribution statistique des débits de crues maximales journalières.

V.6. Analyse des écoulements en régime non influencé

Le régime de tarissement d'une rivière correspond à la décroissance régulière des débits, liée à la vidange des nappes durant les périodes de non alimentation. La décroissance des débits se fait à un rythme qui dépend des caractéristiques physiographiques (nature des sols et du substrat, morphométrie, topographie...) et hydrologiques (état de remplissage des réservoirs, capacité d'emménagement...) des bassins versants.

Les débits de base du Diarha sont proportionnels aux amplitudes de variations saisonnières des altérites : Plus la nappe est haute, plus ils seront soutenus et inversement, plus la nappe baisse et plus les étiages seront prononcés. L'analyse du tableau 63 montre que la durée d'assèchement total à la station du Diarha-pont donne 133 jours en année moyenne, 111 jours comme valeur médiane et dans 75% des cas à 180 jours. Pendant les années à faible hydraulicité comme 1975-1976 ; 1981-1982 ; 1982-1983 ; 1983-1984 ; 1987-1988 ; et 1988-1989 par exemple, la durée d'assèchement est comprise entre 216 et 277 jours (Tab.63). Les débits de base représentent près de 31% de l'écoulement total du Diarha. Les apports en provenance des nappes de versants sont relativement modestes.

Tableau 63. Caractéristiques des tarissements du Diarha.

Date Début	Date Fin	Durée (Jours)	Débit de tarissement Q0 (m3/s)	Coefficient de tarissement α (1/j)	Coefficient Pearson (r2)
31/10/1972	27/01/1973	88	5,84	0,06	0,92
03/12/1974	17/06/1975	196	3,14	0,05	0,96
16/10/1975	03/07/1976	261	10,47	0,04	0,97
04/11/1976	28/02/1977	116	5,04	0,04	0,99
22/10/1977	29/12/1977	68	3,24	0,05	0,99
30/10/1978	07/02/1979	100	7,72	0,04	0,98
29/10/1979	27/01/1980	90	6,53	0,04	0,99
20/02/1980	06/06/1980	107	0,09	0,47	0,77
12/10/1980	21/12/1980	70	5,21	0,05	1,00
22/01/1981	29/05/1981	127	0,04	0,38	0,87
24/10/1981	18/06/1982	237	3,75	0,06	0,94
25/10/1982	28/06/1983	246	5,64	0,05	0,93
18/09/1983	15/06/1984	271	9,63	0,06	0,96
15/10/1985	11/01/1986	88	6,23	0,05	0,99
01/02/1986	09/05/1986	97	0,06	0,03	0,84
17/10/1986	26/11/1986	40	8,11	0,07	0,99
04/12/1986	01/01/1987	28	0,64	0,06	0,95
24/10/1987	27/07/1988	277	9,56	0,07	0,92
18/11/1988	22/06/1989	216	2,88	0,04	0,89
11/10/1989	27/12/1989	77	7,08	0,06	0,91
04/11/1998	01/02/1999	89	5,81	0,05	0,99
06/02/1999	07/06/1999	121	0,11	0,86	0,90
18/10/1999	10/02/2000	115	15,36	0,04	0,99
16/02/2000	25/06/2000	130	0,12	0,35	0,97
18/11/2000	28/01/2001	71	3,11	0,04	1,00
17/02/2001	22/06/2001	125	0,18	0,32	0,94
Moyenne		133	4,83	0,13	0,94
Médiane		111	5,13	0,05	0,96
Quartile 75%		180	6,94	0,07	0,99
Maximum		277	15,4	0,86	0,997

V.7. Apports annuels des sous bassins du Diarha

Les sous bassins du Diarha ne disposent pas de stations hydrométriques. Les bassins versants ayant fait l'objet d'un suivi hydrologique les plus proches de la zone sont : le bassin du Thiokoye et celui du Sili (Fig.161).

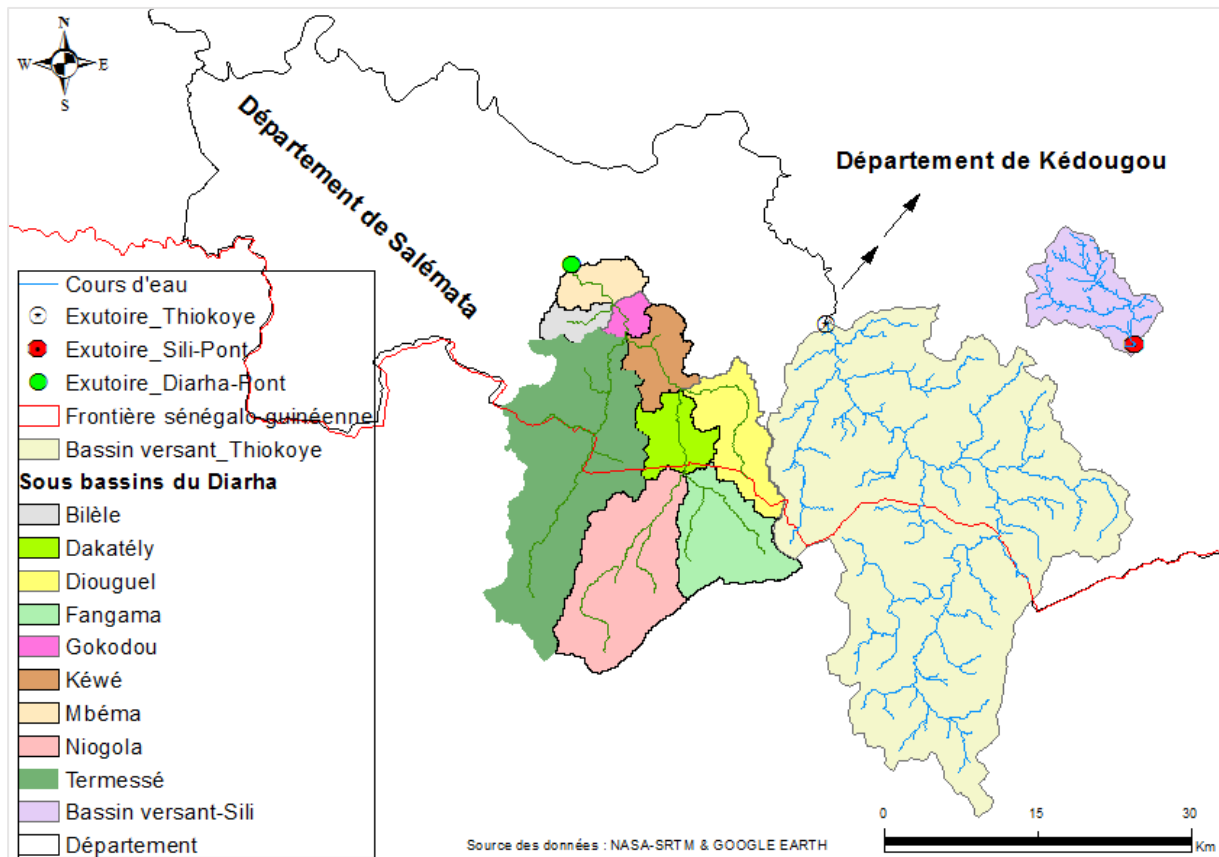


Figure 161. Situation géographique du Thiokoye et du Sili par rapport au bassin du Diarha.

Le bassin du Thiokoye dispose des données discontinues dans le temps : 1971 à 1992 ; et de 1998 à 2002 soit 27 années complètes. Ce bassin se trouve dans le domaine climatique et soumis aux mêmes ambiances climatiques (notamment les sous bassins de la partie amont du Diarha : Termessé, Niogola et Fangama), les facteurs morphopédologique, végétal sont semblables. Il s'agit d'un bassin transfrontalier de 973 km², situé entre la préfecture de Mali (Guinée Conakry) et le département de Kédougou (Sénégal).

Le bassin du Sili, avec une superficie de 89,4 km², est localisé entièrement dans le département de Kédougou. Il a été régulièrement suivi de 1975 à 2001 soit 28 années complètes. Ce bassin se trouve dans le domaine climatique et soumis aux mêmes ambiances climatiques que les sous

bassins de la partie aval du Diarha (Bilèle, Diouguel, Mbéma, Kéwé, Dakately, et Gokodou), les facteurs biogéographique, morphométrique, morphopédologique y sont également semblables.

Ces données de bonne qualité sont utilisées pour déterminer les apports annuels médians, décennaux sec et humide. Un ajustement des modules annuels du Thiokoye et du Sili (Tab.64) a permis de déterminer les modules médians, décennaux secs et humides et les coefficients d'écoulement annuels médian, décennaux sec et humide au niveau des sous bassins du Diarha.

Dans le tableau 65, sont consignés les rapports des surfaces entre, d'une part, le bassin du Thiokoye et les sous bassins de la partie amont, et, d'autre part, celui du Sili et les sous bassins de la partie aval du bassin du Diarha. Ces rapports des surfaces ont été appliqués aux modules du Thiokoye et du Sili pour estimer ceux des sous bassins du Diarha.

Tableau 64. Les modules médians, décennaux secs et humides du Thiokoye et du Sili.

	Récurrance sèche	Médiane	Récurrance humide
Fréquence	0,1	0,5	0,9
Récurrance (année)	10	2	10
Bassin Sili (89.4 km ²)	0,155	0,581	1,683
Bassin Thiokoye (973 km ²)	4,596	8,848	14,52

Tableau 65. Rapport des surfaces des sous bassins du Diarha.

Sous bassins du Diarha		Superficie (km ²)	Rapport des surfaces
Amont	Termessé	274,8	0,282
	Niogola	159,3	0,164
	Fangama	93,7	0,096
Aval	Bilèle	19,7	0,220
	Diouguel	73,93	0,827
	Dakately	44,03	0,493
	Gokodou	14,43	0,161
	Kéwé	44,42	0,497
	Mbéma	31,57	0,353

Les modules médians, décennaux secs et humides des sous bassins du Diarha sont consignés dans le tableau 66. Ces apports annuels des sous bassins sont tout à fait cohérents avec ceux observés sur les bassins de référence, en particulier celui du Sili, avec lequel ils sont dans le même ordre de grandeur. Nous en déduisons que des bassins, soumis aux mêmes ambiances climatiques et de caractéristiques physiographiques semblables, réagissent sensiblement de la même manière aux impulsions pluviométriques.

Tableau 66. Sous bassins du Diarha – Modules médians, décennaux secs et humides.

	Récurrance sèche	Médiane	Récurrance humide
Fréquence	0,1	0,5	0,9
Récurrance (année)	10	2	10
Termessé	1,298	2,499	4,100
Niogola	0,752	1,449	2,377
Fangama	0,443	0,852	1,398
Bilèle	0,034	0,128	0,371
Diouguel	0,128	0,480	1,392
Dakatély	0,076	0,286	0,829
Gokodou	0,025	0,094	0,272
Kéwé	0,077	0,289	0,836
Mbéma	0,055	0,205	0,594

La détermination de la lame d'eau écoulée des sous bassins permet de calculer les volumes correspondants et les coefficients d'écoulement annuels pour les trois années caractéristiques.

Les résultats sont consignés dans le tableau 67. En année médiane, il s'écoulerait :

- Entre 26 870 000 m³ (Fangama) et 78 800 000 m³ (Termessé) dans les sous bassins de la partie guinéenne du bassin du Diarha. Dans cette partie du bassin, le coefficient d'écoulement annuel représente 23% de la lame d'eau précipitée ; les 77% restantes entretiennent les besoins liés à l'évaporation et à l'évapotranspiration.
- Et entre 2 960 000 m³ (Gokodou) et 15 150 000 m³ (Diouguel) dans les sous bassins de la partie sénégalaise du bassin du Diarha. Le coefficient d'écoulement annuel y est, en moyenne, de 18%. Cette faible valeur est à mettre en rapport avec la demande évaporatoire, plus forte dans le bassin aval que dans le bassin amont.

Tableau 67. Sous bassins du Diarha – Apports annuels médians, décennaux sec et humide.

Apports médians		Termessé	Niogola	Fangama	Bilèle	Diouguel	Dakatély	Gokodou	Kéwé	Mbéma
Décennale Sèche	P (mm)	1001	1016	1006	929	922	918	920	926	924
	V. écoulé (10 ⁴ m ³)	4 093	2 373	1 396	108	405	241	79	243	173
	Le (mm)	149,0	149,0	149,0	54,8	54,8	54,8	54,8	54,8	54,8
	Ke (%)	14,89	14,66	14,80	5,90	5,94	5,97	5,96	5,91	5,93
Médiane	P (mm)	1239	1259	1246	1148	1140	1135	1137	1145	1142
	V. écoulé (10 ⁴ m ³)	7 880	4 568	2 687	404	1 515	902	296	910	647
	Le (mm)	286,8	286,8	286,8	204,9	204,9	204,9	204,9	204,9	204,9
	Ke (%)	23,14	22,78	23,01	17,84	17,97	18,05	18,02	17,89	17,94
Décennale Humide	P (mm)	1424	1446	1432	1321	1311	1305	1308	1317	1314
	V. écoulé (10 ⁴ m ³)	12 931	7 496	4 409	1 170	4 390	2 614	857	2 637	1 874
	Le (mm)	470,6	470,6	470,6	593,8	593,8	593,8	593,8	593,8	593,8
	Ke (%)	33,05	32,55	32,86	44,96	45,28	45,48	45,40	45,08	45,20

V.7.1. Relation Pluie moyenne et Lame d'eau écoulée

On s'intéresse particulièrement dans cette étude au devenir de l'eau de pluie, en d'autres termes aux rapports entre l'apport pluvial (P mm) et la lame d'eau écoulée (Le) des sous bassins du Diarha. L'analyse de cette relation par l'intermédiaire de la figure 162 montre que la pluie influence fortement les écoulements des sous bassins ; d'ailleurs le coefficient de détermination R^2 (0.98) montre que 98% de la variabilité de la variable dépendante (Le) est expliquée par la variable explicative (P mm). Par contre, pour les 2% restants, il n'existe pas de bonnes corrélations entre les deux variables. En conséquence, il est nécessaire d'analyser les autres facteurs qui commandent la dynamique hydrologique des sous bassins du Diarha et leur prise en compte pour une meilleure connaissance de l'hydrologie de la région.

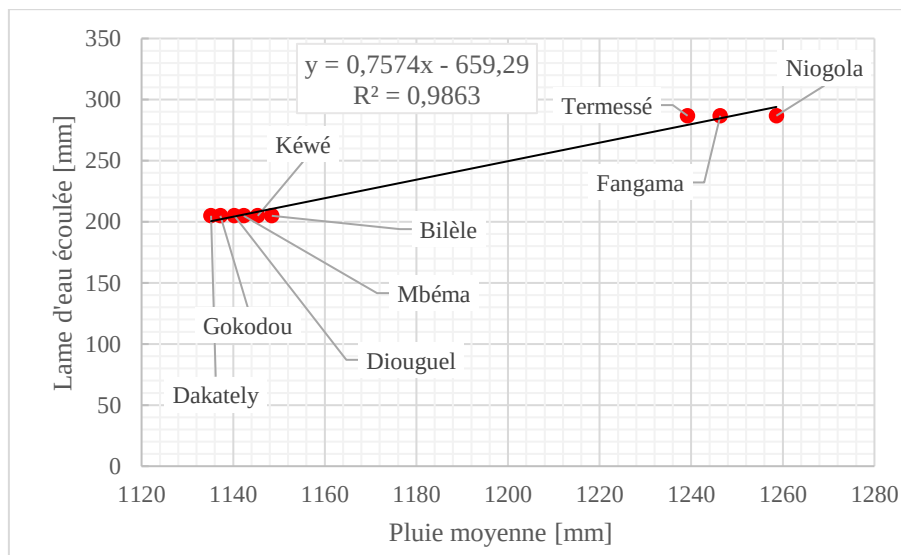


Figure 162. Relation pluie moyenne surfacique et lame d'eau écoulée.

V.7.2. Recherche de relation entre Lame d'eau écoulée et Morphologie

Cette étude vise à montrer l'influence de la morphologie (superficie, distance de vidange, largeur du rectangle équivalent) sur la lame d'eau écoulée des sous bassins du Diarha. L'analyse de ces relations par l'intermédiaire de la figure 163, montre qu'il existe une assez bonne corrélation entre ces variables : le coefficient de détermination R^2 exprime entre 62% et 81% de la variance. Ces corrélations distinguent, d'une part, les bassins amont (Termessé, Niogola, Fangama) plus larges et allongés, et, d'autre part, les bassins aval (Mbéma, Dakatelly, Diouguel, Bilèle, Kéwé, Gokodou) de taille plus petite, et qui ont une capacité de mobilisation moins importante que ceux de la partie amont.

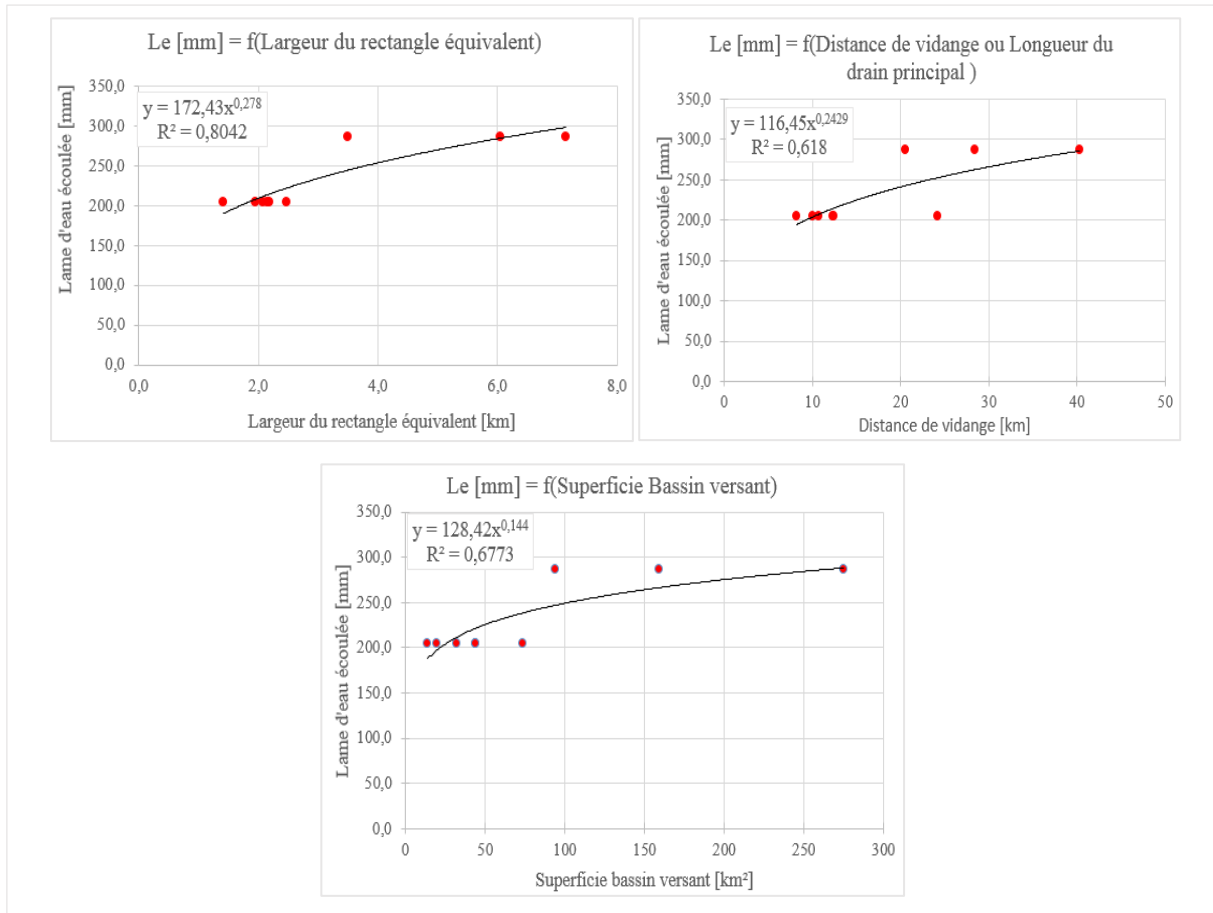


Figure 163. Relation lame d'eau écoulée et morphologie.

V.7.3. Relations Pluie moyenne, Lame d'eau écoulée, Topographie

Dans le bassin versant du Diarha, c'est surtout les conditions locales de topographie et de vent qui contrôlent la redistribution locale de la pluie « hydrologique » (lame d'eau effectivement reçue par le sol) et des lames d'eau écoulées correspondantes. Il faut rappeler que l'essentiel du bassin se trouve en contrebas du versant sous le vent du massif du Fouta Djallon qui réoriente les flux austraux, en fonction de la pente et de l'orientation des versants, et selon la vitesse et la trajectoire des vents locaux. L'analyse des rapports entre, d'une part, pluie moyenne et topographie (altitude), et, d'autre part, entre lame d'eau écoulée et topographie, par l'intermédiaire des figures 164 et 165 montre que ces variables sont très fortement corrélées. D'ailleurs, les coefficients de détermination R^2 expliquent de plus de 97% la variance entre ces variables. Ces corrélations distinguent nettement les bassins de « montagne » (Termessé, Fangama, Niogola), bien arrosés et qui « coulent » beaucoup, de ceux de la partie sénégalaise

(Bilèle, Kéwé, Mbéma, Diouguel, Gokodou, Dakately), moins bien arrosés et où le relief est modéré.

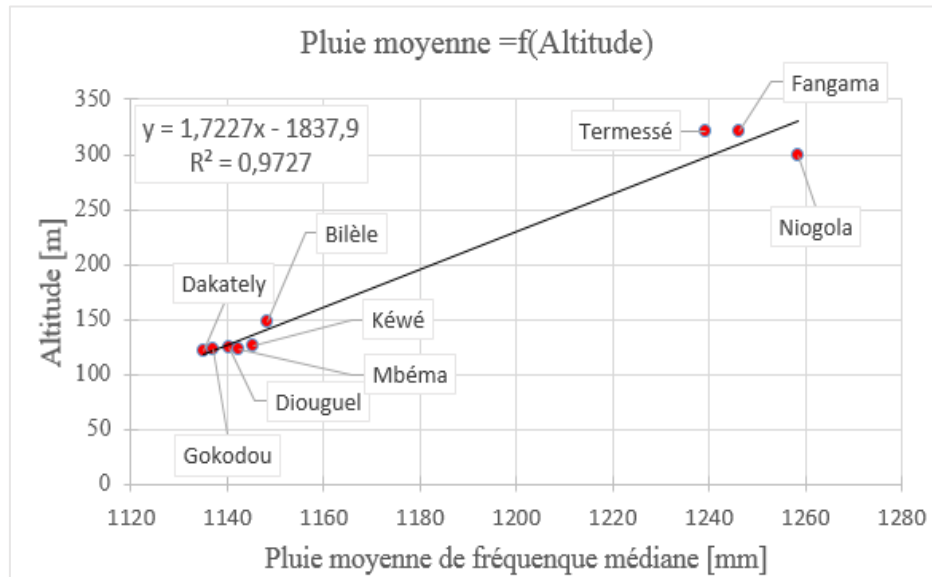


Figure 164. Relation pluie de fréquence médiane et altitude moyenne.

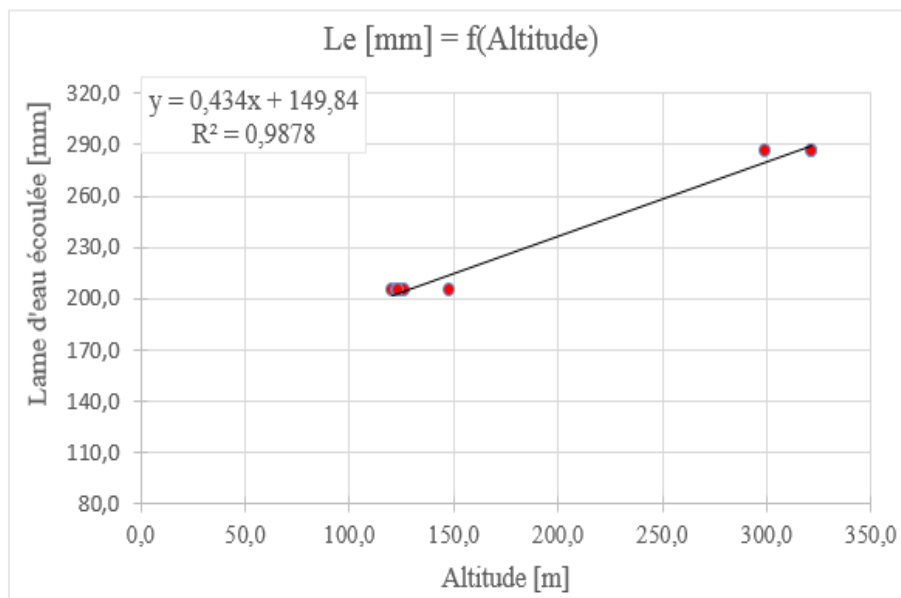


Figure 165. Relation lame d'eau écoulée et altitude moyenne.

V.8. Modélisation du fonctionnement hydrologique des bas-fonds

Un bas-fond, comme toute dépression (naturelle ou artificielle), se caractérise par sa capacité de rétention en eau. Celle-ci peut être obtenue en appliquant l'équation de continuité (Séguis L., Albergel J., & Bader J. C. 1993), connaissant les volumes entrants et sortants de la dépression, ou à partir de levés topographiques (Albergel J., Bernard A., Dacosta H., *et al.* 1990) et bathymétriques (DGPRE, 2015). Dans cette étude, l'imagerie Google Earth de très haute résolution (5 m) a été utilisée pour simuler le remplissage en eau et la capacité de rétention des bas-fonds. La méthodologie consiste d'abord, à réactualiser les cotes (Z) de l'image à l'aide du logiciel Tcx-Converter – sachant que Google Earth fournit des images tridimensionnelles (x, y, z) – ensuite, ces données ont été exploitées sous Surfer 14 pour générer un MNT d'une résolution spatiale de 5 m – suffisamment précis sur le plan spatial pour envisager l'inventaire des ressources en eau des bas-fonds. Le traitement de ce MNT a permis de générer des courbes de niveau très fines (équidistance 1 m) permettant de déterminer les cotes de connexion des bas-fonds avec le Diarha, et le calcul de volume de stockage et de surface.

Comme la plupart des bas-fonds sont alimentés par le Diarha, c'est donc au fur et à mesure que le niveau d'eau monte et en fonction de la topographie de la zone de jonction des bas-fonds avec le Diarha que le remplissage se fait. Par conséquent, nous avons déterminé topographiquement les hauteurs de connexion et au-delà desquelles le Diarha va se déverser dans les bas-fonds. Ces corrélations entre les cotes I.G.N du Diarha et le remplissage de ses bas-fonds ont été établies en fonction de deux postulats :

- ✓ Si les cotes I.G.N du Diarha sont supérieures à celles de ses bas-fonds, alors le Diarha va se déverser dans les bas-fonds qui deviennent ainsi des défluent ;
- ✓ Et si les cotes I.G.N du Diarha leurs sont inférieures, il n'y aura pas de remplissage des bas-fonds. Leurs volumes d'eau évoluent alors uniquement en fonction des ponctions de l'évaporation, des divers prélèvements, des apports de leurs versants et, éventuellement, des bassins élémentaires. Or, comme on l'a vu précédemment, la durée d'assèchement total à la station du Diarha-pont donne 133 jours en année moyenne, 111 jours comme valeur médiane et dans 75% des cas inférieure ou supérieure à 180 jours. Dans un tel contexte hydrologique, les bas-fonds du Diarha et leurs stocks d'eau paraissent stratégiques pour les populations riveraines, surtout pour les éleveurs et leurs cheptels.

V.8.1. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Mbéma

La cote de jonction du bas-fond de Mbéma avec le Diarha est de 55 m (Tab.68). Au-delà de cette cote le bas-fond fonctionne comme un défluent. En effet, pendant la saison des pluies, si le Diarha est à la cote 58 m, un volume de 1 772 417 m³ est attendu dans le bas-fond de Mbéma. Par contre, une fois que la cote maximale de remplissage du bas-fond (cote 67 m soit un volume de 46 209 261 m³) est atteinte, c'est l'inverse qui se produirait. Le bas-fond fonctionnerait comme un affluent du Diarha. La connaissance de l'évolution de ces cotes de remplissage et des volumes correspondants est une donnée capitale, notamment pour le calibrage des petits ouvrages de stockage d'eau de types bassins de rétention, digues de protection ou d'aménagements terminaux.

Les données consignées dans le tableau 68 ont permis de tracer les courbes hauteur-volume-surface dont les résultats sont présentés à la figure166.

Tableau 68. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Mbéma

Cotes de remplissage [m]	Volume potentiel [m ³]	Potentiel inondable [ha]	Profondeur [m]
55	0	0	0
56	18 566	22,6	1
57	591 760	90,3	2
58	1 772 417	162,8	3
59	3 871 949	248,8	4
60	6 713 303	320,0	5
61	10 241 648	386,0	6
62	14 509 147	465,4	7
63	19 523 113	538,0	8
64	25 216 142	598,7	9
65	31 501 016	659,9	10
66	38 464 434	735,5	11
67	46 209 261	812,1	12

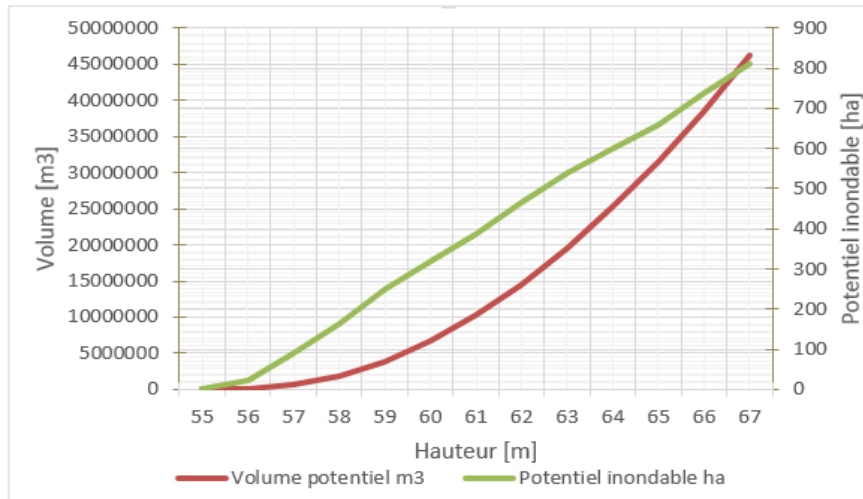


Figure 166. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Mbéma

V.8.2. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Dakately

Le Diarha est connecté au bas-fond de Dakately à la cote 75 m (Tab.69). Si le niveau du Diarha est inférieur à cette cote, le bas-fond du Dakately fonctionne d'une manière autonome. Ses volumes d'eau évoluent uniquement en fonction des ponctions de l'évaporation, des divers prélèvements, des apports émanant des versants ou du bassin du Dakately. Par contre, en saison des pluies, si le niveau d'eau du Diarha est supérieur à 75 m, le remplissage du bas-fond s'amorce (Tab.64). Sa submersion complète correspond à la cote 90 m, soit un volume de stockage de 50 779 403 m³. Une fois que cette cote est atteinte, le bas-fond de Dakately devient un affluent du Diarha. Il amorce ainsi sa vidange jusqu'à la reprise des pluies.

Les données consignées dans le tableau 69 ont permis de tracer les courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Dakately dont les résultats sont présentés à la figure 167.

Tableau 69. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Dakately.

Cotes de remplissage [m]	Volume potentiel [m ³]	Potentiel inondable [ha]	Profondeur [m]
75	0	0	0
76	1 084	0,5215	1
77	28 229	13,3256	2
78	407 054	63,496	3
79	1 313 510	115,7068	4
80	2 697 953	159,0146	5
81	4 519 406	209,4784	6
82	6 828 676	250,5121	7
83	9 539 828	297,3742	8
84	12 925 655	376,7638	9

85	17 014 565	446,3011	10
86	21 945 956	534,2818	11
87	27 669 204	611,9202	12
88	34 295 339	713,9967	13
89	42 004 415	826,2639	14
90	50 779 403	929,4572	15

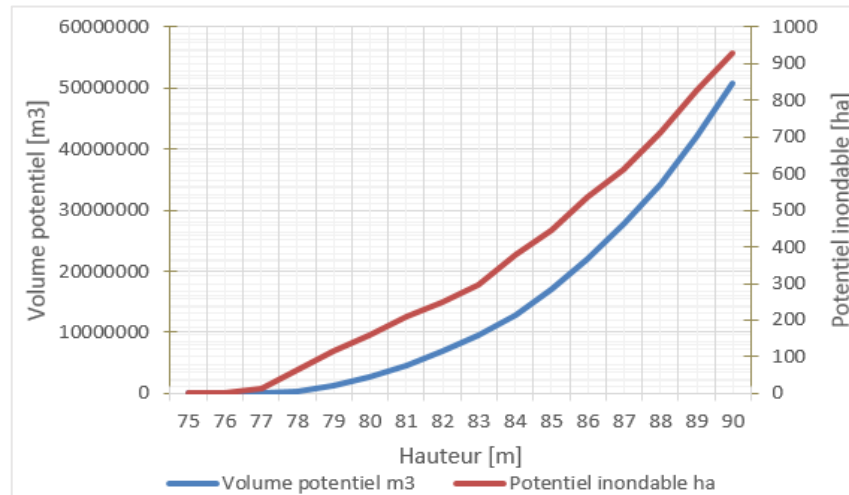


Figure 167. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Dakately.

V.8.3. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Gokodou

La cote de connexion du Diarha avec le bas-fond de Gokodou est de 63 m (Tab.70). Pendant la saison des pluies, si le Diarha atteint la cote 67 m, un volume de 425 932 m³ alimentera le bas-fond de Gokodou. Mais, à la cote 75 m, le bas-fond sera complètement submergé ; dans ce cas il fonctionne comme un affluent du Diarha.

Si l'on considère que le bas-fond peut se remplir jusqu'à la cote 69 m (cote moyenne de remplissage), la surface que va occuper l'eau est de 155,6 ha, et le volume de remplissage sera égal à 2 302 840 m³. La mise en place d'un ouvrage de 1 mètre de hauteur en aval du bas-fond, permettrait de faire passer ce volume stocké à 4 226 234 m³.

Tableau 70. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Gokodou.

Cotes de remplissage	Volume potentiel [m ³]	Potentiel inondable [ha]	Profondeur [m]
63	0	0	0
64	3707	2,04	1
65	73 961	9,30	2
66	203 918	14,8	3
67	425 932	37,6	4
68	1 038 493	87,7	5
69	2 302 840	155,6	6

70	4 226 234	215,7	7
71	6 708 178	266,7	8
72	9 629 948	304,0	9
73	12 923 288	339,9	10
74	16 575 734	373,5	11
75	20 568 379	407,2	12

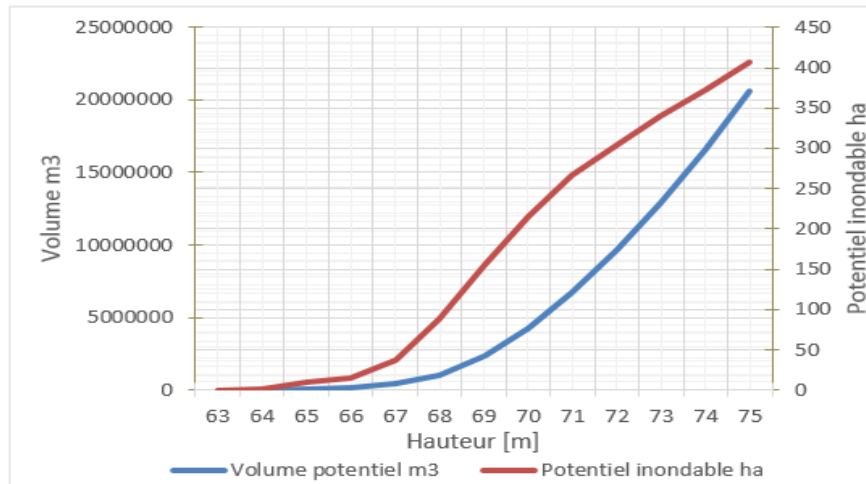


Figure 168. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Gokodou.

V.8.4. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Kéwé

La cote de jonction du bas-fond de Kéwé avec le Diarha est de 66 m (Tab.71). Au-delà de cette cote le bas-fond fonctionne comme un défluent. En effet, si on considère que le bas-fond peut se remplir jusqu'à la cote 75 m (cote moyenne de remplissage du système), un volume de 7 031 666 m³ alimentera le bas-fond. C'est l'inverse qui se produit lors de la submersion du bas-fond à la cote 83 m, où son trop plein s'écoule en direction du Diarha.

Tableau 71. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Kéwé.

Cotes de remplissage	Volume potentiel m ³	Potentiel inondable ha	Profondeur
66	0	0	1
67	0,4	0,01	2
68	19 978	5,2	3
69	145 742	21,0	4
70	457 380	42,1	5
71	996 914	64,4	6
72	1 749 697	87,2	7
73	2 743 505	121,4	8
74	4 479 375	216,5	9
75	7 031 666	295,7	10
76	10 539 275	400,2	11
77	15 136 058	525,0	12

78	21 215 775	689,6	13
79	28 763 324	813,0	14
80	37 442 453	924,1	15
81	47 234 215	1035,2	16
82	58 110 714	1139,9	17
83	70 096 943	1262,1	18

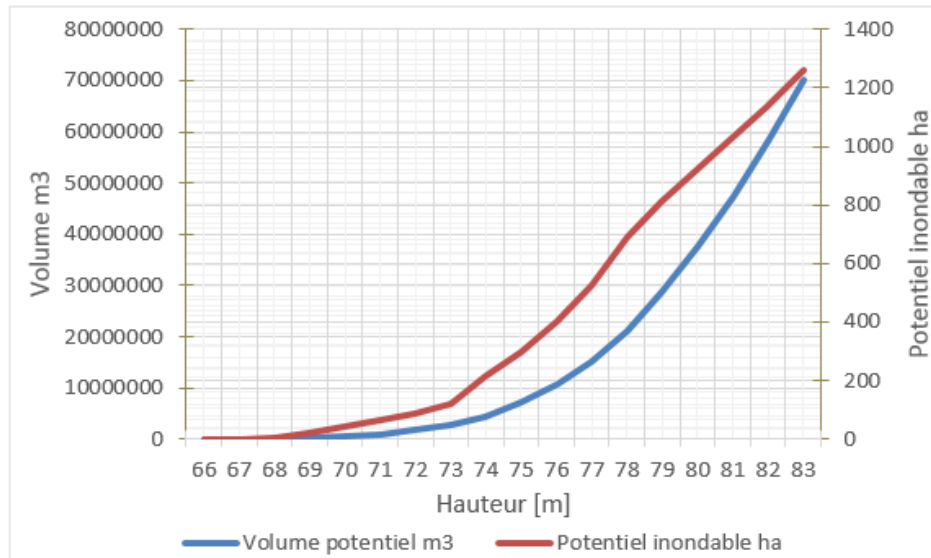


Figure 169. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Kéwé.

V.8.5. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Diouguel

Le bas-fond de Diouguel est raccordé au Diarha à la cote 76 m (Tab.72). Au-delà de cette cote, le Diarha alimente le bas-fond qui fonctionne ainsi comme un défluent.

Le volume de remplissage moyen du bas-fond de Diouguel est de 40 401 243 m³, à la cote 94 m du Diarha. La construction d'un ouvrage de stockage de 1 mètre en aval du bas-fond pourrait faire passer ce volume stocké à 48 696 521 m³.

Le volume de stockage maximal du bas-fond est de 223 639 634 m³. Cette forte capacité de rétention est surtout liée à l'importance des apports hydriques des versants, mais aussi aux apports de la rivière de Diouguel qui totalise 8% des écoulements du Diarha. C'est pourquoi ce bas-fond est très souvent engorgé pendant la saison des pluies.

Les données relatives aux cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Diouguel, consignées au tableau 72, ont permis de tracer les courbes hauteur-volume-surface dont les résultats sont présentés à la figure 170.

Tableau 72. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Diouguel.

Cotes de remplissage [m]	Volume potentiel [m ³]	Potentiel inondable [ha]	Profondeur [m]
76	0	0	0
77	27 593	7,5	1
78	184 540	24,0	2
79	510 309	41,0	3
80	987 248	55,3	4
81	1 611 436	70,0	5
82	2 410 607	89,5	6
83	3 396 060	107,8	7
84	4 595 076	134,8	8
85	6 125 439	172,2	9
86	8 066 190	214,9	10
87	10 409 208	253,8	11
88	13 174 854	300,1	12
89	16 410 259	347,9	13
90	20 174 765	404,0	14
91	24 483 841	458,8	15
92	29 391 595	523,2	16
93	34 999 310	600,0	17
94	41 402 243	683,8	18
95	48 696 521	775,5	19
96	56 924 319	872,5	20
97	66 164 776	978,1	21
98	76 476 964	1085,9	22
99	87 850 205	1188,1	23
100	100 256 628	1296,5	24
101	113 803 852	1414,9	25
102	128 574 628	1540,5	26
103	144 669 819	1678,6	27
104	162 127 425	1817,2	28
105	181 032 109	1964,9	29
106	201 444 432	2127,4	30
107	223 639 634	2317,4	31

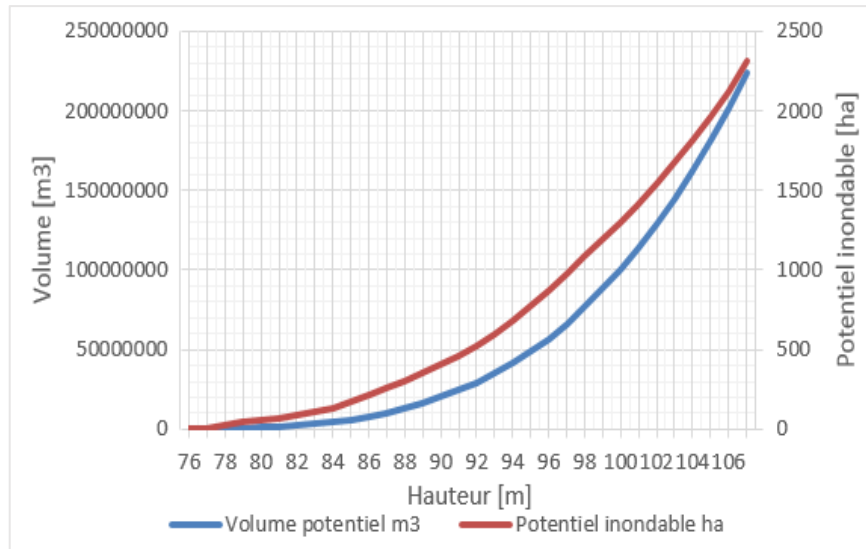


Figure 170. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Diouguel.

V.8.6. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Bilèle

Le Diarha est raccordé au bas-fond de Bilèle à la cote 63 m (Tab.73). Au-delà de cette cote, il alimente le bas-fond qui fonctionne donc comme un défluent. À la cote 70 m, le volume de stockage du bas-fond est estimé à 2 750 504 m³.

Si le niveau du Diarha est inférieur à 63 m, le bas-fond du Bilèle fonctionne d'une manière autonome. Ces volumes d'eau évoluent en fonction des apports hydriques des versants, des ponctions de l'évaporation ou des divers prélèvements.

Le volume moyen de stockage du bas-fond de Bilèle est de 29 116 684 m³. Un ouvrage de 1 mètre de hauteur, construit en aval du bas-fond, pourrait faire passer ce volume à 32 458 352 m³.

La submersion du bas-fond de Bilèle est atteinte à la cote 102 m. Cette cote correspond à un volume de stockage maximal de 136 171 364 m³, inondant une surface de 847,2 ha. Cette forte capacité de rétention est surtout liée à l'importance des apports hydriques des versants, mais aussi, dans une certaine mesure, aux apports de la rivière de Bilèle qui représente 2% des écoulements du Diarha.

Tableau 73. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Bilèle.

Cotes de remplissage [m]	Volume potentiel [m ³]	Potentiel inondable [ha]	Profondeur [m]
63	0	0	0
64	729	0,5	1
65	68 317	14,9	2
66	315 300	35,8	3
67	735 500	47,4	4
68	1 269 692	60,4	5
69	1 944 788	74,3	6
70	2 750 504	86,2	7
71	3 678 807	101,5	8
72	4 780 107	119,0	9
73	6 060 151	136,4	10
74	7 504 532	153,7	11
75	9 156 326	175,9	12
76	11 009 546	195,0	13
77	13 046 312	212,7	14
78	15 260 878	230,3	15
79	17 650 383	248,2	16
80	20 224 140	266,5	17
81	22 984 703	286,5	18
82	25 952 097	307,2	19
83	29 116 684	325,8	20
84	32 458 352	343,0	21
85	35 986 821	363,9	22
86	39 733 745	386,1	23
87	43 702 896	408,6	24
88	47 922 910	436,8	25
89	52 422 050	463,8	26
90	57 193 797	491,3	27
91	62 241 750	519,7	28
92	67 566 719	545,9	29
93	73 138 623	570,0	30
94	78 968 066	597,5	31
95	85 095 155	629,1	32
96	91 518 113	656,5	33
97	98 208 018	682,6	34
98	105 158 844	709,1	35
99	112 382 039	740,1	36
100	119 956 572	776,8	37
101	127 890 769	811,3	38
102	136 171 364	847,2	39

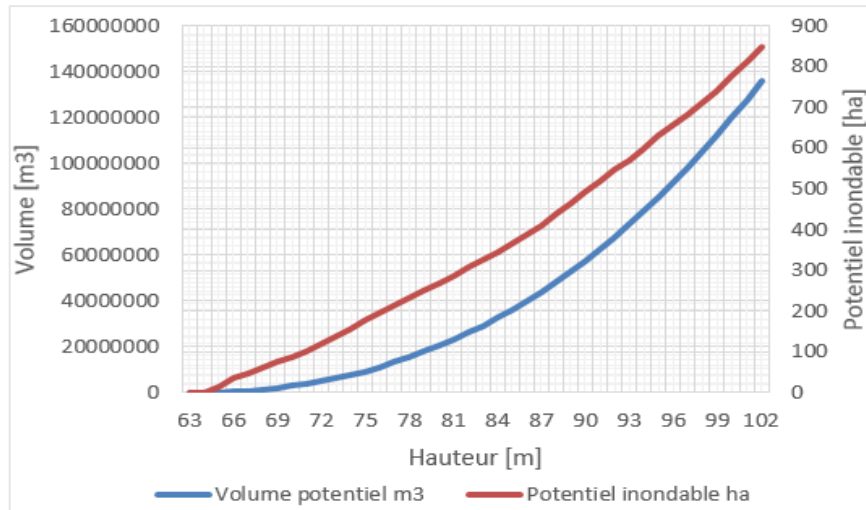


Figure 171. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Bilèle.

V.8.7. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Termessé

La cote de jonction du Diarha avec le bas-fond de Termessé est de 67 m (H0) (Tab.74). Au-delà de cette cote, Le Diarha alimente le bas-fond qui fonctionne comme un défluent. À la cote 72 m (H5) du Diarha, un volume de 1 957 499 m³ est attendu dans le bas-fond de Termessé ; à H6 (cote 73 m), le volume passe de 1 957 499 m³ à 3 711 339 m³.

Le volume moyen de stockage du bas-fond de Termessé est de 112 052 587 m³. Il s'agit d'un bas-fond très large et qui peut stocker jusqu'à 783 hm³ d'eau et inonder une superficie de 56,8 km². Cette forte capacité de rétention est liée à la fois aux importants apports venant des versants et de la rivière de Termessé, qui contribue à elle seule de 40% des apports hydriques du Diarha.

Tableau 74. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Termessé.

Cotes de remplissage (m)	Volume potentiel m ³	Potentiel inondable (ha)	Profondeur m
67	0	0.0	0
68	112	0.1	1
69	4 376	1	2
70	132 160	36	3
71	765 149	91	4
72	1 957 499	150	5
73	3 711 339	200	6
74	5 921 310	242	7
75	8 548 389	283	8
76	11 600 986	327	9
77	15 106 742	376	10
78	19 206 729	448	11
79	24 091 117	530	12

80	29 788 556	611	13
81	36 294 230	693	14
82	43 691 852	792	15
83	52 137 274	897	16
84	61 620 952	1003	17
85	72 245 796	1125	18
86	84 122 874	1254	19
87	97 365 553	1397	20
88	112 052 587	1541	21
89	128 188 180	1689	22
90	145 838 392	1844	23
91	165 051 982	2002	24
92	185 894 010	2170	25
93	208 489 500	2354	26
94	232 955 511	2541	27
95	259 288 056	2728	28
96	287 469 753	2909	29
97	317 432 072	3087	30
98	349 193 340	3269	31
99	382 812 256	3457	32
100	418 297 661	3644	33
101	455 717 165	3845	34
102	495 214 854	4059	35
103	536 866 095	4279	36
104	580 851 525	4524	37
105	627 345 610	4785	38
106	676 514 799	5052	39
107	728 394 317	5337	40
108	783 375 310	5681	41

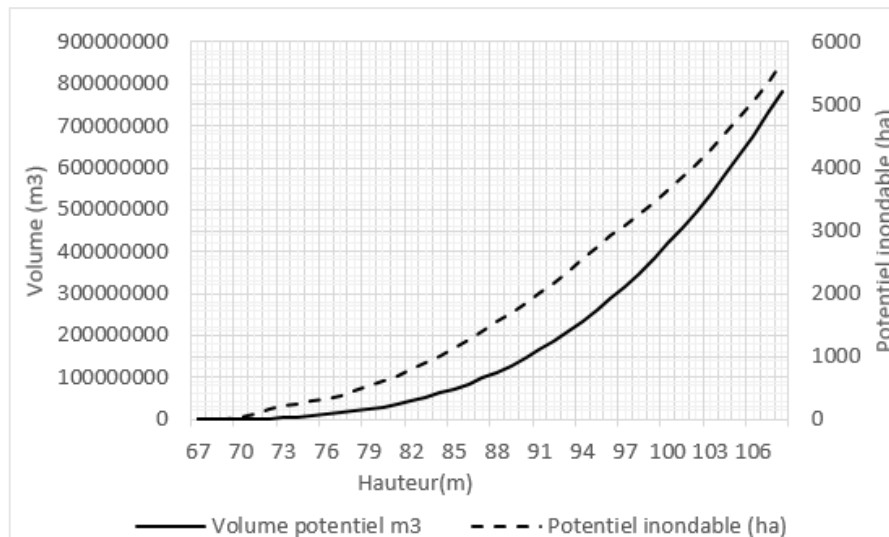


Figure 172. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Termessé.

V.8.8. Fonctionnement hydrologique des bas-fonds de Fangama

Localisés le long de la rivière de Fangama et de ses affluents, les bas-fonds de Fangama présentent quelques particularités. Il faut rappeler que le Diarha est né de la jonction entre le Fangama et le Niogola – et que donc, en tenant compte de la configuration hydrologique amont-aval et de l'hétérogénéité de la topographie – ces rivières fonctionnent d'une manière autonome, indépendamment du Diarha, tout comme l'est le fonctionnement hydrologique de leurs bas-fonds.

Les bas-fonds de Fangama sont répartis sur deux sites : le bas-fond de l'axe Sintiou-Bayq (27,5 km²) et celui du village de Fangama (22,3 km²). Comme ces bas-fonds sont alimentés par la rivière de Fangama, c'est donc au fur et à mesure que le niveau d'eau monte et en fonction de la topographie de la zone de jonction des bas-fonds avec la rivière que le remplissage se fait. Par conséquent, nous avons déterminé topographiquement les hauteurs de connexion et au-delà desquelles le Fangama va se déverser dans ses bas-fonds.

Le bas-fond de Sintiou-Bayq est raccordé au bassin de la rivière de Fangama à la cote 93 m (H0), hauteur au-delà de laquelle le remplissage du bas-fond s'amorce. À la cote 95 m (H2), le volume de stockage du bas-fond est de 10 755 m³ ; à H5 (cote 98 m) ce volume passe à 441 746 m³ et à 3 951 237 m³ à H10 (cote 103 m), par exemple (Tab.75). La cote de remplissage maximale du bas-fond est de 135 m (H42). Cette cote correspond à un volume de stockage maximal de 269 004 749 m³, sur une surface de 27,8 km².

Tableau 75. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Sintiou-Bayq.

Cotes remplissage (m)	Volume potentiel m ³	Potentiel inondable ha	Profondeur (m)
93	0	0	0
94	0,28	0,01	1
95	10 755	2,7	2
96	65 807	9,0	3
97	196 031	17,9	4
98	441 746	32,1	5
99	846 815	48,4	6
100	1 404 427	62,8	7
101	2 096 824	75,3	8
102	2 920 021	90,9	9
103	3 951 237	116,2	10
104	5 239 829	141,6	11
105	6 789 830	168,4	12
106	8 604 051	194,4	13
107	10 691 674	223,7	14

108	13 088 579	256,0	15
109	15 791 172	284,8	16
110	18 818 991	321,4	17
111	22 198 393	354,6	18
112	25 902 263	386,2	19
113	29 927 659	420,5	20
114	34 326 408	460,6	21
115	39134 923	501,2	22
116	44 335 184	539,9	23
117	49 930 941	580,4	24
118	55 947 459	625,0	25
119	62 421 059	670,2	26
120	69 347 905	715,2	27
121	76 706 444	756,9	28
122	84 473 962	797,9	29
123	92 667 259	841,8	30
124	101 338 181	896,0	31
125	110 599 831	959,6	32
126	120 565 630	1035,8	33
127	131 335 267	1120,0	34
128	142 966 931	1208,9	35
129	155 532 126	1304,9	36
130	169 038 279	1399,3	37
131	183 638 450	1535,3	38
132	200 015 543	1766,2	39
133	219 350 658	2112,9	40
134	242 435 741	2507,1	41
135	269 004 749	2785,3	42

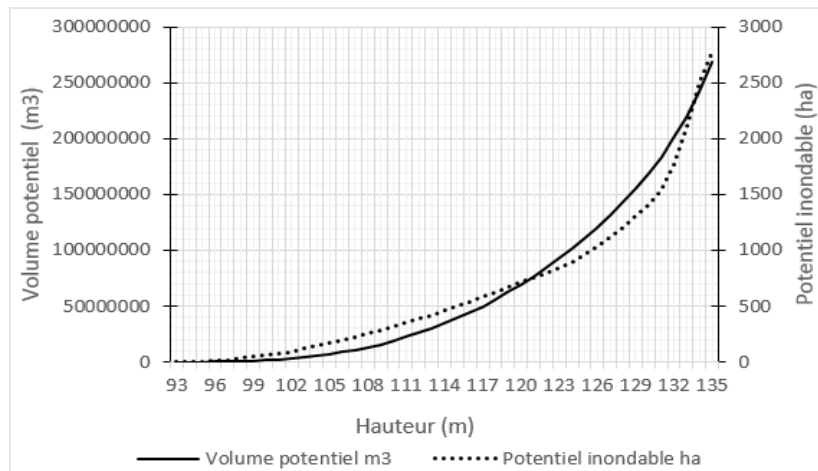


Figure 173. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Sintiou-Bayq.

Le bas-fond du village de Fangama est connecté à la rivière de Parawol (affluent du Fangama) à la cote 92 m (H0). Son volume de stockage à la cote 97 m (H5) est de 1 560 225 m³ et de 8 869 670 m³ à la cote 102 m (H10), par exemple (Tab.76).

Les capacités de rétention maximale des bas-fonds de Fangama varient de 269 004 749 m³ (bas-fond de l'axe Sintiou-Bayq) à 450 108 344 m³ (bas-fond du village de Fangama). Cette forte capacité de rétention est surtout liée à l'importance des apports hydriques des versants.

Tableau 76. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du village de Fangama.

Cotes de remplissage (m)	Volume potentiel (m ³)	Potentiel inondable (ha)	Profondeur (m)
92	0	0	0
93	4 998	2,5	1
94	117 104	20,7	2
95	418 180	39,1	3
96	899 588	56,8	4
97	1 560 225	74,4	5
98	2 397 512	96,1	6
99	3 515 547	126,9	7
100	4 938 496	160,7	8
101	6 733 550	197,5	9
102	8 869 670	230,5	10
103	11 346 525	266,1	11
104	14 209 284	306,1	12
105	17 486 950	351,5	13
106	21 218 534	394,0	14
107	25 359 266	434,4	15
108	29 903 383	474,6	16
109	34 842 490	513,7	17
110	40 171 321	550,2	18
111	45 850 326	586,9	19
112	51 893 786	622,6	20
113	58 313 274	662,0	21
114	65 128 205	702,1	22
115	72 361 525	747,1	23
116	80 087 954	798,5	24
117	88 321 503	848,3	25
118	97 036 407	895,3	26
119	106 231 623	945,2	27
120	115 938 082	996,7	28
121	126 168 593	1050,2	29
122	136 927 828	1102,9	30
123	148 213 155	1155,5	31
124	160 037 637	1211,4	32
125	172 447 117	1271,2	33
126	185 460 381	1333,5	34
127	199 089 077	1394,2	35
128	213 296 617	1448,4	36

129	228 050 722	1504,8	37
130	243 371 946	1560,9	38
131	259 264 823	1620,3	39
132	275 740 748	1677,5	40
133	292 786 860	1734,2	41
134	310 416 904	1794,2	42
135	328 637 358	1852,2	43
136	347 426 703	1909,2	44
137	366 813 303	1968,9	45
138	386 765 577	2025,1	46
139	407 285 778	2082,2	47
140	428 388 860	2142,8	48
141	450 108 344	2203,2	49

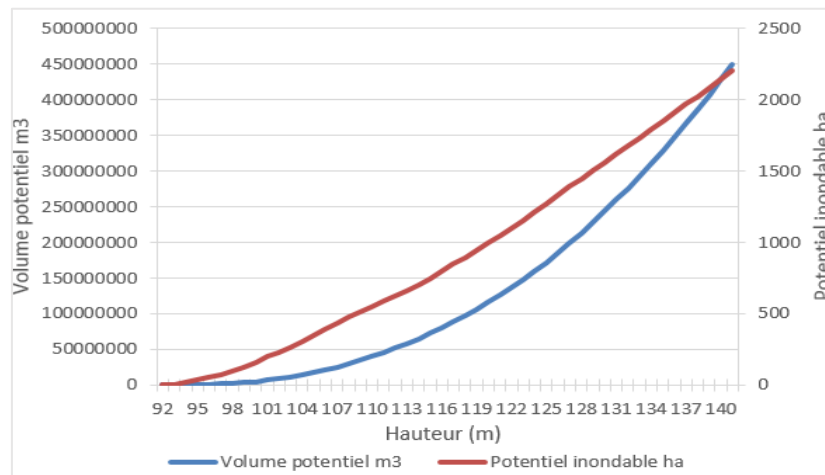


Figure 174. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond du village de Fangama.

V.8.9. Fonctionnement hydrologique des bas-fonds de Niogola

Il a été recensé 41,2 km² de bas-fond dans le bassin versant du Niogola. Localisés le long du Niogola et des affluents, ces bas-fonds sont répartis entre les sites de Niogola (27 km²), Sabéré (5,2 km²) et de Parawol (9 km²). Ainsi, pour simuler le fonctionnement hydrologique des bas-fonds, nous avons déterminé topographiquement les cotes de jonction et au-delà desquelles la rivière de Niogola va se déverser dans ses bas-fonds :

- si les cotes du Niogola sont supérieures à celles de ses bas-fonds, alors le Niogola va se déverser dans les bas-fonds qui deviennent ainsi des défluent ;
- Et si les cotes du Niogola leurs sont inférieures, il n'y aura pas de remplissage des bas-fonds. Leurs volumes d'eau évoluent alors uniquement en fonction des ponctions de l'évaporation, des divers prélèvements et des apports hydriques des versants.

Les données relatives aux cotes de remplissage, volume et potentiel inondable des bas-fonds du bassin versant de Niogola, consignées aux tableaux 77-79, ont permis de tracer les courbes hauteur-volume-surface dont les résultats sont présentés aux figures 175-177. Ainsi, les cotes de jonction entre le Niogola et ses bas-fonds varient de 101 m (bas-fonds sites de Niogola et de Parawol) à 103 m (bas-fond de Sabéré). Au-delà de ces cotes, la rivière alimente les bas-fonds qui fonctionnent ainsi comme des défluent.

La capacité maximale de stockage des bas-fonds varie de 214 608 741 m³ (bas-fond site de Niogola) à 62 105 677 m³ (bas-fond de Sabéré). Cette forte capacité de rétention est liée à l'importance des apports hydriques des versants – en relation avec les fortes pentes transversales des bas-fonds – mais aussi des apports de la rivière de Niogola qui totalisent 23% des écoulements du Diarha.

Tableau 77. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du village de Niogola.

Cotes de remplissage (m)	Volume potentiel m ³	Potentiel inondable ha	Profondeur (m)
101	0	0,0	0
102	0,92	0,01	1
103	7 751	1,9	2
104	38 847	4,4	3
105	109 298	11,2	4
106	285 502	24,6	5
107	604 965	38,8	6
108	1 070 992	56,0	7
109	1 721 897	74,5	8
110	2 560 507	93,2	9
111	3 591 560	114,1	10
112	4 868 284	143,6	11
113	6 447 588	172,3	12
114	8 320 479	203,4	13
115	10 520 677	236,6	14
116	13 053 952	271,1	15
117	15 935 209	305,7	16
118	19 176 315	344,9	17
119	22 851 891	392,2	18
120	27 058 950	452,7	19
121	31 847 800	505,4	20
122	37 146 625	555,7	21
123	42 954 237	607,4	22
124	49 272 867	658,0	23
125	56 101 126	709,7	24
126	63 453 342	764,7	25
127	71 379 549	823,3	26
128	79 920 993	889,8	27

129	891 96 405	969,6	28
130	99 294 410	1053,6	29
131	110 279 947	1145,9	30
132	122 188 118	1237,8	31
133	135 026 695	1334,7	32
134	148 840 353	1433,3	33
135	163 669 105	1536,5	34
136	179 534 681	1641,9	35
137	196 490 804	1755,0	36
138	214 608 741	1876,6	37

Tableau 78. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du site de Parawol.

Cotes de remplissage (m)	Volume potentiel m ³	Potentiel inondable ha	Profondeur (m)
101	0	0	0
102	8 197	4,0	1
103	123 737	19,9	2
104	405 340	35,4	3
105	829 298	49,5	4
106	1 392 718	63,4	5
107	2 105 622	79,5	6
108	2 993 880	100,4	7
109	4 129 560	125,9	8
110	5 491 301	146,3	9
111	7 048 880	165,6	10
112	8 805 596	185,9	11
113	10 767 115	206,7	12
114	12 949 139	230,0	13
115	15 399 377	263,2	14
116	18 207 047	298,2	15
117	21 345 552	329,5	16
118	24 783 964	357,9	17
119	28 494 665	384,8	18
120	32 478 115	412,9	19
121	36 755 055	443,4	20
122	41 357 457	478,0	21
123	46 302 159	511,9	22
124	51 588 456	546,6	23
125	57 245 477	587,3	24
126	63 334 785	632,6	25
127	69 896 862	681,7	26
128	76 948 400	729,6	27
129	84 473 161	777,5	28
130	92 485 998	827,3	29
131	101 027 424	884,1	30
132	110 161 048	945,3	31

Tableau 79. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du site de Sabéré.

Cotes de remplissage (m)	Volume potentiel m ³	Potentiel inondable ha	Profondeur (m)
103	0	0	0
104	4 628	2,7	1
105	101 776	16,2	2
106	313 620	26,0	3
107	614 266	33,9	4
108	983 794	39,8	5
109	1 406 844	45,0	6
110	1 883 509	50,4	7
111	2 417 892	56,6	8
112	3 022 092	64,9	9
113	3 718 432	74,0	10
114	4 497 209	81,7	11
115	5 350 644	89,3	12
116	6 284 779	97,9	13
117	7 305 428	106,0	14
118	8 401 449	114,1	15
119	9 597 149	125,7	16
120	10 905 507	136,3	17
121	12 329 560	148,8	18
122	13 881 826	163,3	19
123	15 588 340	177,1	20
124	17 413 684	188,4	21
125	19 365 866	202,9	22
126	21 461 663	215,5	23
127	23 665 079	225,6	24
128	25 968 564	235,6	25
129	28 371 890	245,7	26
130	30 877 504	256,4	27
131	33 496 499	267,9	28
132	36 225 226	278,7	29
133	39 062 572	289,8	30
134	42 011 487	301,0	31
135	45 071 353	312,0	32
136	48 238 272	322,4	33
137	51 507 686	332,8	34
138	54 885 087	345,0	35
139	58 408 533	361,2	36
140	62 105 677	379,3	37

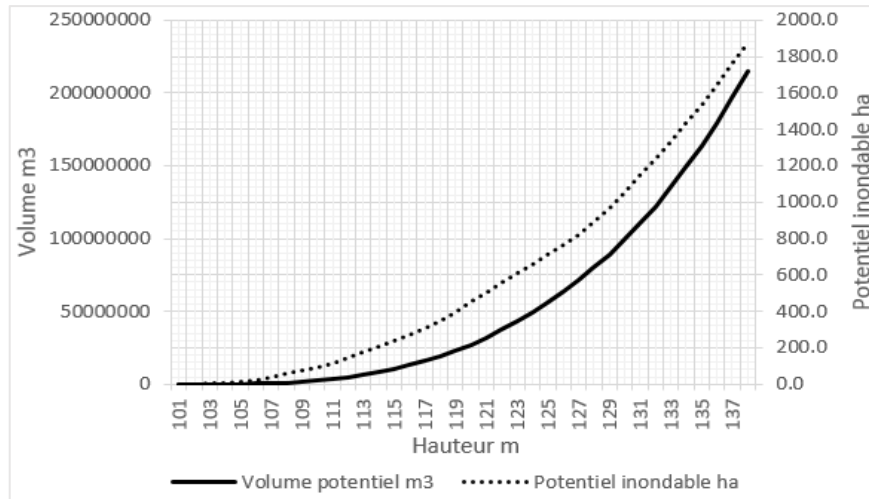


Figure 175. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond du village de Niogola.

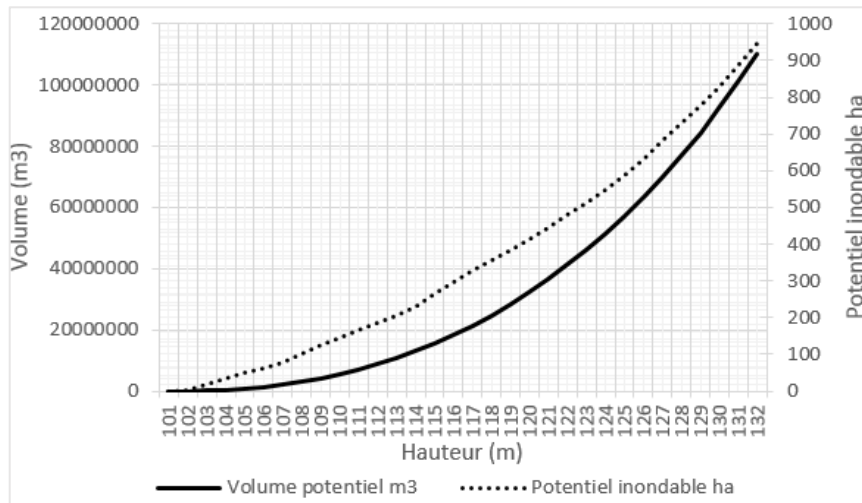


Figure 176. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond du village de Parawol.

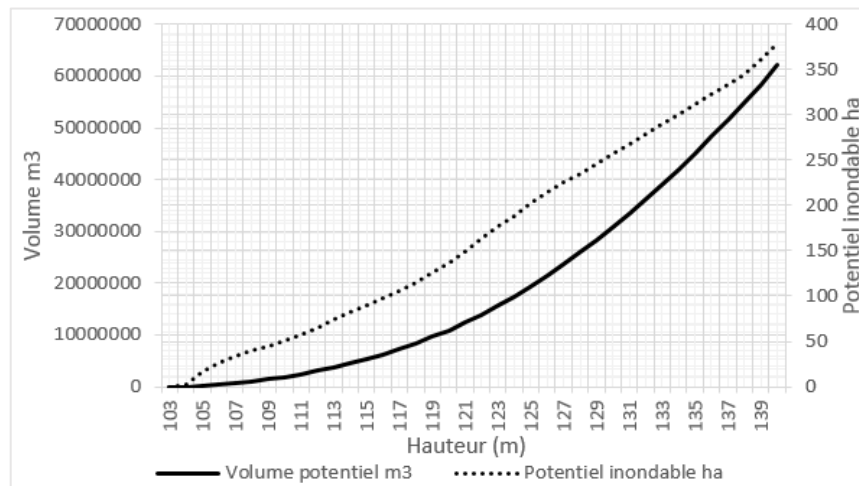


Figure 177. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Sabéré.

V.9. Classification des bas-fonds en fonction des « faciès » des régimes hydroclimatiques

Les bas-fonds étant des zones de rétention et de réception des eaux de ruissellement, sont fortement dépendant des conditions pluviométriques, qui comme on le sait déjà, sont marquées par une grande variabilité interannuelle et des fluctuations à long terme qui dénotent, l'existence de quatre périodes bien distinctes qui confirme d'une part, la tendance à la hausse de la pluviosité entre 1950 et 1967 – d'autre part, sa baisse entre 1968 et 1993 – la période avant 1950 et depuis le milieu des années 90 se ressemblent – entourant la moyenne par une forte variabilité interannuelle. La reprise des pluies, amorcée depuis le milieu des années 90, s'est accentuée au cours de la décennie 2001-2010, qui marque un retour des conditions pluviométriques à leur niveau moyen. Toutefois, elle s'accompagne d'une forte irrégularité interannuelle des pluies et des écoulements, impactant ainsi l'économie rurale des populations et l'écologie des bas-fonds du bassin versant du Diarha.

Les bas-fonds sont engorgés pendant une bonne partie de l'année, généralement de juin à décembre, période pendant laquelle ils offrent toutes les fonctionnalités d'une zone humide. En outre, la diversité et la richesse de leur paysage en font le support privilégié des activités socio-économiques notamment l'agriculture, le pastoralisme et l'exploitation des ressources forestières.

Pour établir une classification des bas-fonds par approche ACP, nous analysons ce que nous avons appelé « faciès » des régimes hydroclimatiques :

- Distribution des écoulements annuels :
 - Module annuel.....Man ;
 - Lamé d'eau écoulee médiane.....Lemed ;
 - Lamé d'eau écoulee décennale sèche.....Ledecs ;
 - Lamé d'eau écoulee décennale humide.....Ledech ;
- Distribution de la pluviométrie annuelle :
 - Pluviométrie moyenne annuelle.....Pmoy ;
 - Pluviométrie moyenne de fréquence médiane.....Pmed ;
 - Pluviométrie moyenne de fréquence décennale sèche.....Pdec ;
 - Pluviométrie moyenne de fréquence décennale humide.....Pdech ;

L'ACP permet de regrouper les bas-fonds des sous bassins du Diarha de la manière suivante (Fig.178). Les trois groupes de bas-fonds s'ordonnent dans le sens d'une abondance et régularité décroissantes :

- les plus réguliers sont constitués par les bas-fonds des groupes 1, 2. Il s'agit des bas-fonds des sous bassins de la partie amont du Diarha (Termessé, Niogola et Fangama), avec une pluie moyenne de 1210 mm, leurs bassins écoulent en année médiane 23% de la lame d'eau précipitée. En année déficitaire, un écoulement, bien que faible, est toujours observé. Ce qui nous permet de qualifier ces groupes de réguliers et abondants. Par contre, le groupe 2, constitué par les bas-fonds des bassins de Niogola et de Fangama, est le plus régulier. Situés dessus de l'isohyète 1200 mm, ces bas-fonds sont bien alimentés et « coulent » beaucoup ; d'ailleurs, c'est de la confluence entre le Niogola et le Fangama que le Diarha est né. Les bas-fonds du bassin du Termessé (groupe 1), de taille plus grande, ont une forte capacité de rétention en eau, ce qui réduit l'irrégularité en retenant totalement les faibles écoulements lors des années déficitaires.
- À l'opposé, le groupe 3 que nous pouvons qualifier de faible et irrégulier, est composé des bas-fonds des sous bassins de la partie sénégalaise du bassin du Diarha (Bilèle, Gokodou, Dakately, Diouguel, Kéwé et Mbéma). Avec une pluie moyenne de 1100 mm, les bassins de ces bas-fonds écoulent, en année médiane, à peine 18% de la lame d'eau précipitée ; plus de 80% du volume précipité est reprise par évaporation et par la transpiration des végétaux. En année déficitaire (décennale sèche), environ 6% du volume précipité est écoulé.

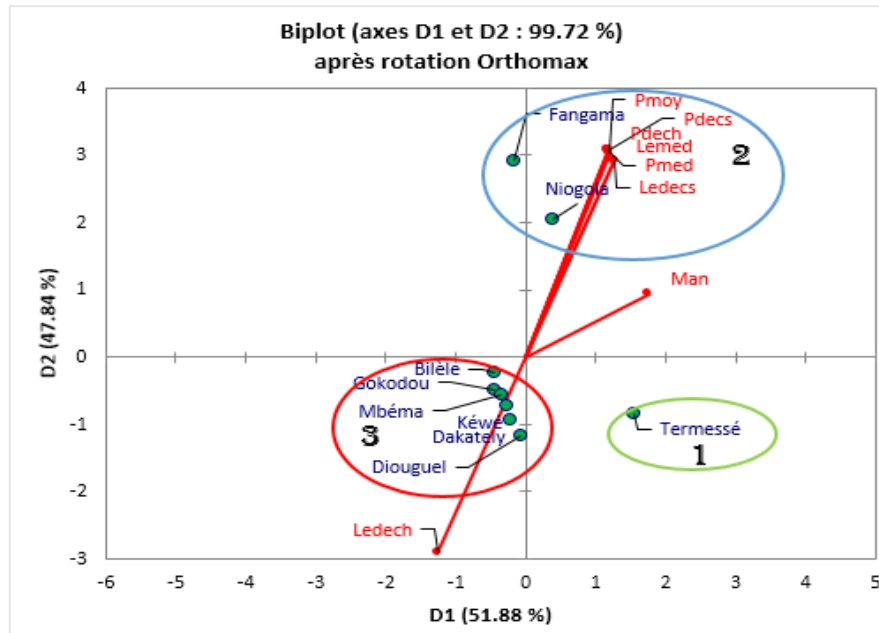


Figure 178. ACP montrant la similarité des bas-fonds en fonction des « faciès ».

Cette analyse réalisée à partir des « faciès » respecte la typologie que nous avons élaborée par rapport aux unités paysagiques. Nous montrons ainsi, la validité, la cohérence et l'unicité de ces deux typologies (Fig.179) :

- ✓ les bas-fonds au-dessus de l'isohyète 1200mm. Il s'agit des bas-fonds typiques de la zone guinéenne, bien drainés, étroits et peu encaissés, dont les franges et la zone centrale sont occupées respectivement par la forêt galerie et la savane arborée. Ils occupent les parties hautes de la toposéquence – cote moyenne des versants est de 106 m – avec des pentes transversales comprises entre 2 et 6%. Leurs caractéristiques pédologiques sont dominées par des sols hydromorphes à pseudo-gley vertiques sur matériaux argileux gonflant ou à pseudo-gley sur matériau gravionnaire, pratiquement inaptes à la riziculture inondée. Par contre, ils conviennent parfaitement à l'agriculture irriguée, des cultures de décrues ou supportant l'inondation passagère. Ces bas-fonds sont rencontrés dans les bassins versants de Fangama et de Niogola (partie guinéenne du bassin du Diarha).
- ✓ les bas-fonds de l'isohyète 1200 mm, très larges et encaissés. Ces bas-fonds appartiennent à la famille des bas-fonds soudano-guinéens. Ils se caractérisent par des flancs à pentes abruptes (6%), peuplés par la forêt galerie, et une zone centrale par la savane arborée. Leur morphopédologie est dominée par les sols alluviaux, dans leur

partie aval (zone soudanienne) et de sols peu évolués d'apports, en amont (zone guinéenne). Cette famille de bas-fonds est rencontrée dans le bassin versant du Termessé.

- ✓ et les bas-fonds de l'isohyète 1100mm. Il s'agit des bas-fonds larges et encaissés, dont la zone centrale est occupée par une végétation de type savane boisée et les franges par la forêt galerie. Les cotes moyennes de leurs versants est de 100m avec une pente transversale moyenne de 2,4%. La pédologie de cette famille de bas-fonds est dominée par les sols alluviaux (régosols sur matériau alluvial ou sur matériau gravionnaire), à texture fine argilo-limoneuse et argilo-sableuse. Ses types de sols sont réputés pour leur fort potentiel rizicole car très riches en éléments nutritifs (azote, phosphate, matières organiques, calcium...). Cette famille de bas-fonds est rencontrée dans les bassins versants de Bilèle, Kéwé, Diouguel, Mbéma, Gokodou et Dakately.

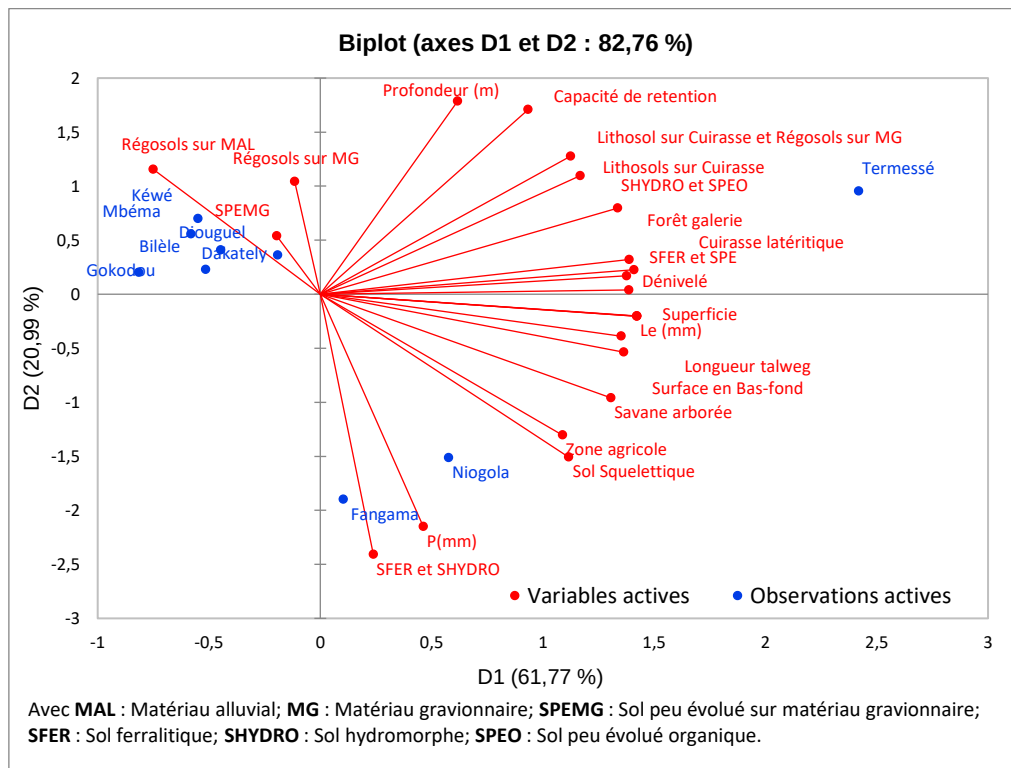


Figure 179. Typologie des bas-fonds des sous bassins du Diarha : rôle des paramètres physiques et hydroclimatiques

Conclusion

Cette étude a montré l'impact négatif de la récession pluviométrique sur les ressources en eau des bas-fonds du bassin versant du Diarha. En effet, l'irrégularité des pluies s'est accompagnée d'une grande variabilité interannuelle et saisonnière des écoulements du bassin du Diarha favorisant ainsi le tarissement de plus en plus précoce de sa rivière. D'une manière générale, trois séquences de l'évolution des modules ont été observées :

- De 1961 à 1967 : phase à forte hydraulicité (excédentaire) durant laquelle les modules moyens excèdent de 34% le module interannuel ($7,3 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- De 1968 à 1993 : phase à faible hydraulicité (déficitaire) avec une baisse de 18% des écoulements du Diarha. Ce déficit est à mettre en rapport avec la longue sécheresse qui a frappé le bassin du Diarha par une baisse de 11% des précipitations.
- Enfin, de 1994 à 2012, une reprise des écoulements se manifeste, mais avec une grande variabilité interannuelle, marquée notamment par une forte sécheresse en 2002. Durant cette période, les modules moyens excèdent de 12% le module interannuel ($7,3 \text{ m}^3/\text{s}$), mais sans retour à l'hydraulicité d'avant la sécheresse.

A l'échelle saisonnière, l'analyse des écoulements du Diarha a montré que l'essentiel des apports est concentré sur quatre mois (juillet à octobre) période pendant laquelle la pression sur les ressources en eau de surface est quasi nulle. Ce déséquilibre dans la répartition des écoulements impacte fortement toutes les activités économiques (agriculture, pastoralisme, agroforesterie...) dans le bassin.

Cette situation mérite la prise en compte du climat dans les politiques de gestion et d'exploitation durable des ressources en eau des bas-fonds du Diarha (conception d'aménagement hydraulique, hydroélectrique, définition de stratégies d'adaptation appropriées...) en vue de réduire la vulnérabilité des systèmes écologiques à l'irrégularité des pluies et la variabilité des écoulements.

CHAPITRE VI. IMPACTS HYDROLOGIQUES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Article scientifique

SPRINGER-NATURE BOOKS

Status: Published

Assessment of Hydrological Impacts of Climate Change on the Diarha Watershed

Ibrahima THIAW^{1*}; Bakary FATY¹; Honoré DACOSTA¹, Anastasie MENDY¹, Abel Vincent MANGA¹, Amadou Abdoul SOW¹

¹ Laboratory of Hydrology and Morphology, Cheikh Anta Diop University, P.O.B 5005 Dakar-Senegal

* Corresponding Author (I. THIAW) Email: ibrahima4.thiaw@ucad.edu.sn

Résumé en français

Cet article présente une évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eaux de surface à l'échelle du bassin versant du Diarha, un affluent du fleuve Gambie, situé en Afrique de l'Ouest. L'approche consiste à comparer deux modèles hydrologiques (GR4J et SAC-SMA) du logiciel RS Minerve. L'optimisation automatique des modèles repose sur l'utilisation d'une fonction multicritère qui regroupe les critères de Nash, de Nash-In, de KGE' et de R selon la méthode Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA). Le modèle hydrologique qui reproduit le mieux la relation pluie-débit pendant la phase de validation croisée (1975-1992 et 1998-2003) a été forcé à l'aide de données climatiques quotidiennes projetées à l'horizon 2050. L'évaluation des impacts futurs des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin repose sur l'utilisation de trois modèles climatiques régionaux (IPSL-CM5A-LR, INM-CM4 et GFDL-ESM2G) résultant des projections climatiques CORDEX. La méthode de correction de biais CDFt a été appliquée à ces scénarios avant leur utilisation dans le modèle hydrologique. Les débits caractéristiques du bassin de la rivière Diarha ont été calculés afin de caractériser leur évolution dans les scénarios climatiques projetés à l'horizon 2050. Les résultats obtenus montrent que le modèle GR4J est mieux à même de reproduire les hydrogrammes observés du Diarha que le modèle SAC-SMA : les valeurs des critères de Nash-In, KGE' et R sont supérieures à 80% en calibration comme en validation, tandis que le Nash varie entre 91% (en calibration) et 62% (en validation). En outre, le changement climatique a un impact significatif sur les flux futurs du Diarha. Les modèles

climatiques prévoient une diminution des débits annuels de 5% selon le scénario RCP4.5 et de 25% sous RCP8.5. Les modèles prévoient, au-delà de la baisse des débits annuels, une forte diminution des débits caractéristiques (D_{MAX}, DCC_{10j}, DCC_{20j}, DC₁, DC₂ et DC₃) dans les deux scénarios d'émission.

Mots clés : Changement Climatique ; CORDEX ; Diarha ; Impacts hydrologiques ; RS Minerve

Abstract

This article assesses impacts of climate change on surface water resources in the Diarha watershed, a tributary of the Gambia River, in West Africa. The analysis is based on the parallel application of two hydrological models (GR4J and SAC-SMA) with RS Minerve software, and includes an automatic optimization based on a multi-criteria function that aggregates the Nash, Nash-In, KGE' and R criteria according to the Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA) method. The hydrological model that best replicates the rainfall-runoff relationship during the cross-validation phase (1975-1992 and 1998-2003) was fed with daily climate data projected for the 2050 horizon, while evaluation of future impacts of climate change on basin hydrology was based on the use of three Regional Climate Models (IPSL-CM5A-LR, INM-CM4, and GFDL-ESM2G) from CORDEX climate projections. CDF-t bias correction was applied to these scenarios before application to the hydrological model. Flow rates of the Diarha river basin were subsequently calculated in order to characterize their contribution to the projected climate scenarios at the 2050 horizon. Results indicate that the GR4J model is better able to reproduce the observed hydrographs of the Diarha river basin than the SAC-SMA model: values of the Nash-In, KGE' and R criteria were greater than 80% in both calibration and validation, while the Nash model's performance varied between 91% (in calibration) and 62% (in validation). The models predict that climate change will have a significant impact on the Diarha's future flows, characterized by a decrease in annual streamflows of 5% under the RCP4.5 scenario, and 25% under RCP8.5. The models furthermore project a decrease in the characteristic high flows (D_{MAX}, DCC_{10j}, DCC_{20j}, DC₁, DC₂ and DC₃) in both emission scenarios.

Key words: Climate change; CORDEX; Diarha watershed; Hydrological impacts; RS Minerve

1. Introduction

The 1990s and 2000s are marked by a slight resumption of rainfall in the Sahelian zone (Lebel and Ali, 2009; Panthou *et al.* 2014; Fall, 2014; Marega, 2016) after a long period of drought that not only weakened the functioning of hydrosystems but also affected human activities such as agriculture, fisheries and livestock (Dacosta, 1989; Servat *et al.* 1998). This return of rainfall intensity has been observed across several West African watersheds, including the Senegal (Cissé *et al.* 2014), Gambia (Faye, 2018), and Diarha (Thiaw, 2017) rivers, putting their hydrological functioning at risk. It has been suggested that the return to humid conditions observed in some West African watersheds over the past few decades could be caused by anthropogenic contributions to climate change (Paeth and Hense, 2004). However, the monitoring and assessment of these hydrosystems is hampered by a low density of monitoring networks associated with a lack of financial resources for national hydrological services (Bodian, Dezetter, & Dacosta, 2015), so attribution of hydrological impacts of climate change to rainfall or any other cause or causes would not be based on robust data.

Spot data for temperature, precipitation and potential evapotranspiration available at several monitoring stations are key inputs to existing water balance models, compensating for a lack of flow data (Bop, 2014); in our study, a rainflow model transforms time series describing the climatic conditions of a watershed into a series of flows. This indirect assessment is an essential tool to understand the future of rainwater and its dynamics in a watershed, the preferred scale for hydrological studies. Given the complexity of this process, often several mathematical models are used in parallel: global conceptual models, semi-distributed and distributed models. The accuracy of these models to simulate flows is improved by calibrating parameters (Gutpa *et al.*, 2003, Vrugt *et al.*, 2006) -- modifying them until the output of the model corresponds to an observed data set (Liu, 2009) -- which has enabled automatic optimization techniques for hydroclimatic models in recent decades (Duan *et al.*, 1992; Vrugt *et al.* 2003).

Hydrological impacts of climate change include an increase in evaporation coupled with rainfall variability, which can significantly affect surface runoff, frequency and intensity of floods and droughts, soil moisture and water available for irrigation and hydroelectric production (Setegn *et al.* 2011). In West Africa, the work of Roudier *et al.* (2014) shows that previous studies focused mainly on individual watersheds and were based on Global- (GCM) or Regional Climate Model (RCM) projections. More recently, the CORDEX (Regional Climate Reduction

Experience Coordinated, Giorgi *et al.*, 2009; Famien *et al.*, 2018) initiative indicates an overall decrease in rainfall of 20%-30% in Africa, resulting in a decrease in river flow ranging from 40%-60% (Biao, 2017).

In Senegal, studies of the Gambia and Senegal river basins (Ardoïn-Bardin *et al.* 2009; Bodian *et al.* 2013; Roudier *et al.* 2014; Mbaye *et al.* 2015; Bodian *et al.* 2018; Stanzel, 2018) suggest a decrease in the flow of its rivers by the end of the 21st century, correlating with a decrease in precipitation. Future impacts of climate change have not been projected for the Diarha sub-basin. The few studies of the large basins of the Gambia, at Gouloumbou (Ardoïn-Bardin *et al.* 2009; Stanzel, 2018) and Mako (Bodian *et al.* 2018), project a reduction in water resources in the Gambia of between 4% and 26%, but these studies do not provide disaggregate projections at the level of each sub-basin of the Gambia. It is essential to assess the sensitivity of water resources to future climate change at finer spatial scales in order to understand fluctuations, given the significant uncertainties of hydroclimatic models (Brulebois, 2016; Stanzel, 2018). In addition, local analysis provides a basis for integrating climate into sustainable water resource management and exploitation policies (e.g., water management design, hydroelectric development, definition of appropriate adaptation strategies to reduce the vulnerability of ecological systems to irregular rainfall and flow variability.)

Two models of RS Minerve (GR4J and SAC-SMA) were compared to evaluate the hydrological impacts of climate change on the Diarha river basin. The CORDEX approach among three regional climate models (IPSL -CM5A-LR, INM-CM4 and GFDL-ESM2G) that best reflects the rainfall-runoff relationship during the cross-validation phase (1975-1992 and 1998-2003) will be applied to project flows of the Diarha in a near future (2020-2050).

2. Materials and Methods

2.1. Study area

The Diarha catchment is a tributary of the left bank of the Gambia River. It extends between the parallels 12°26' and 12°63' and the meridians -12°86' and -12°57'. The physical environment of the basin has been described in earlier work (Thiaw *et al.* (2017)). With an area of 759.3 km² and a perimeter of 145.1 km, the Diarha extends 45 km upstream-to-downstream. Geologically, the basin lies entirely in the Paleozoic and Proterozoic formations of the Birrimian basement, which has given rise, as a result of the physico-chemical alteration of the rocks, to low permeability and very fragile soils. Its Sudano-Guinean climate is marked by the

spatial and temporal variability of precipitation since the 1967 climate break. From that time to the year 2014, precipitation in the catchment has decreased by 10.5%. This decrease in precipitation is attributable to the drought of the 1970s, which has been continuous since 1968 for all the rainfall stations studied, and the magnitude of which, analysed by the Standardized Precipitation Index (SPI), is greater than that of the offsetting wet period (1921-1967) (Thiaw, 2017). In addition to changing its hydrological regime and increased water erosion problems (Thiaw and Dacosta, 2017), this drought has resulted in diminished rainfed and dry season farming systems, now threatening food self-sufficiency. However, a slight return of rainfall conditions has been noted over the last two decades (1991-2010) (Thiaw, (2017)) which also implies potential changes in the hydrological behavior of the watershed.

2.2. Data and Tools

2.2.1. Observed Data

The observed data (temperatures and daily rains) used in this study are from the national meteorological agencies of Senegal and Guinea Conakry. Figure 180 shows that the rainfall stations in the basin are very poorly distributed, with only three stations in the basin itself, with another located in the east, far from the basin.

Table 80 provides the inventory of available climatic data and the percentage of days that are unmeasured for each station during the reference period 1960-2012. Although not common to all stations, this period is consistent with observed temperature and rainfall data and has relatively few gaps.

Hydrological data from the Diarha station at the road bridge are from the database of the Water Resources Management and Planning Directory (DGPPE). The Diarha was followed regularly between 1972 and 1992, with only a two-year gap between 1973 and 1974. Its average annual flow is $7 \text{ m}^3/\text{s}$, which equates to a volume of about $212.10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ (Thiaw, 2017).

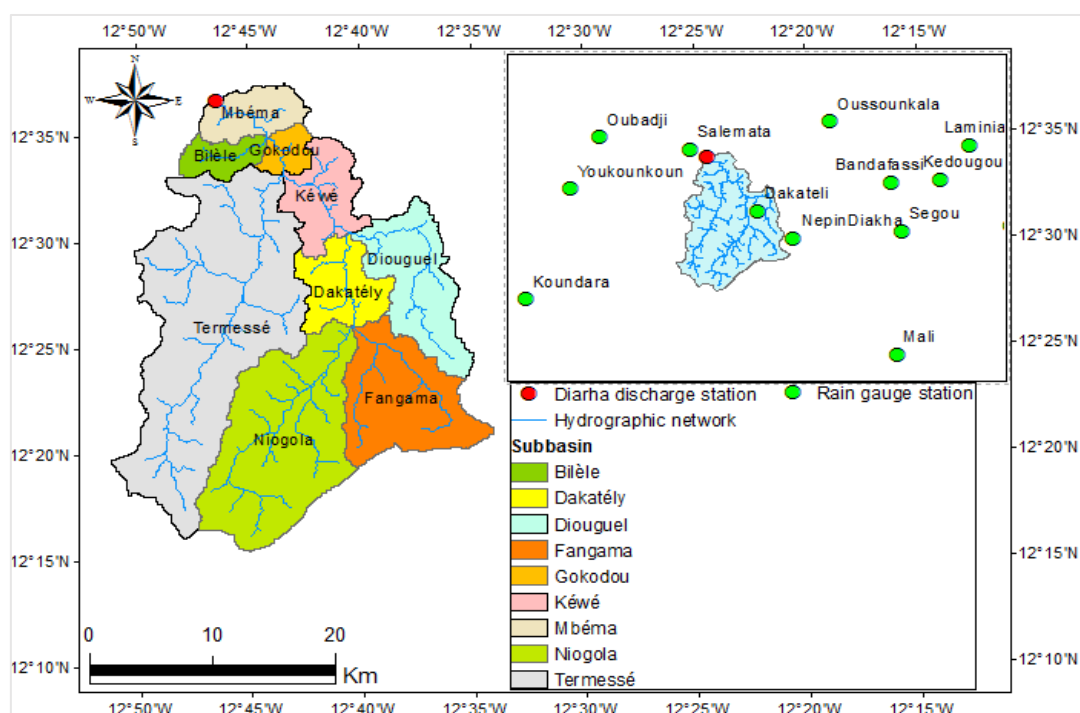


Figure.180. Diarha watershed - Location map of measurement networks

Table.80. Inventory of rainfall and daily temperature data observed

Longitude	Latitude	Station Id.	Data Description	Start of record	End of record	Gap %
-12.15	12.25	Bandafassi	Daily Rainfall	1/1/1975	1/1/2014	0.05
-12.64	12.46	Dakatély	Daily Rainfall	1/1/1980	1/1/2015	26.51
-12.01	12.25	Fongolimbi	Daily Rainfall	1/1/1963	1/1/2015	0.02
-12.13	12.34	Kédougou	Daily Rainfall	1/5/1918	12/31/2016	0.02
			Daily Temperature	1/1/1961	12/31/2013	0.01
-13.11	12.47	Koundara	Daily Rainfall	1/1/1950	12/31/1994	0.004
-12.18	11.19	Labé	Daily Rainfall	1/1/1923	1/1/2008	1.2
			Daily Temperature	1/1/1950	12/31/2012	1.1
-12.11	12.64	Laminia	Daily Rainfall	1/1/1989	12/31/2002	0.5
-12.56	12.39	Nepin-Diakha	Daily Rainfall	1/1/1980	12/31/2001	2.0
-12.69	10.81	Pita	Daily Rainfall	1/1/1950	12/31/1982	0.10
-12.81	12.63	Salemata	Daily Rainfall	1/5/1973	1/1/2015	4.05
-11.47	12.47	Saraya	Daily Rainfall	1/1/1948	1/1/2015	0.01
-11.40	11.26	Tougué	Daily Rainfall	1/1/1968	11/9/2014	1.26
-13.30	12.50	Youkounkoun	Daily Rainfall	1/1/1950	1/1/1995	5.89
-11.23	12.85	Kéniéba	Daily Temperature	1/1/1950	31/12/2012	1.1
-12.08	10.36	Mamou	Daily Temperature	1/1/1960	31/12/2006	0.01

2.2.2. RS Minerve Model

RS Minerve is a hydrological and hydraulic modeling software program developed by the Center for Research on the Alpine Environment (CREALP) and Hydro Cosmos SA, in collaboration with the Polytechnic University of Valencia, Hydro10 and the Federal Polytechnic School of Lausanne. It simulates the production and transfer of flows over a complex watershed according to a semi-distributed conceptual scheme and an object-oriented approach. It incorporates several rain-flow models, such as GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J and HBV.

The RS Expert module of the software allows a thorough evaluation of simulation results. Automatic calibration is applied using different algorithms, such as Shuffled Complex Evolution, developed by the University of Arizona (SCE-UA) (Duan *et al.*, 1994) and the Uniform Adaptive Monte Carlo (Gilks *et al.*, 1998, Liu, 2001). The coupled method, Latin Hypercube (Rosenbrock, 1960), calculates the best hydrological parameters according to a user-defined Objective Function (OF). For fluvial propagation, Lag-Time, Kinematic-Wave, Muskingum-Cunge and St-Venant are applied. In addition, the scenario-simulation module simulates weather scenarios or other parameters to study the variability and sensitivity of model results.

The two RS Minerve models GR4J and SAC-SMA tested in this study are calibrated in a semi-distributed conceptual mode to distinguish the respective contributions of each sub-basin to the natural flow of the large basin (Figures 181, 182). They require (i) a spatial meteorological database (virtual stations) which provide daily rainfall and temperature for each climate station, and (ii) the vector layers of the watersheds for the automatic calculation of mean rainfall and potential evapotranspiration (ETP). The Diarha basin has been described accordingly in the ArcMap environment to create Hydrological Response Units (HRU), which include area, center of gravity (x, y and z) and the longest flow-path of each HRU (Table 81). Using the RS Minerve GIS module, the vector layers of the HRUs were imported into the program; because each sub-basin is associated with a virtual weather station (Figure 181, 182), the coordinates for the centers of gravity (x, y and z) have been used for spatial interpolation using the Thiessen polygon method (Roche, 1963). The ETP was calculated using Oudin's methodology (2006), which is based on average daily temperatures and the latitude of the study area.

Table.81. Parameters of Hydrological Response Units

HRU	Area [km ²]	Longest Flow path [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
Termessé	274.8	40300	741466	1375370	132
Niogola	159.3	28500	747162	1365570	174
Fangama	93.7	20600	756923	1369230	160
Bilèle	19.7	10080	742252	1390280	66
Diouguel	73.93	24180	758190	1379220	93
Dakately	44.03	12470	752031	1379030	107
Gokodou	14.43	8212	747620	1390750	74
Kéwé	44.42	12380	750577	1386850	92
Mbéma	31.57	10724	744745	1394010	62

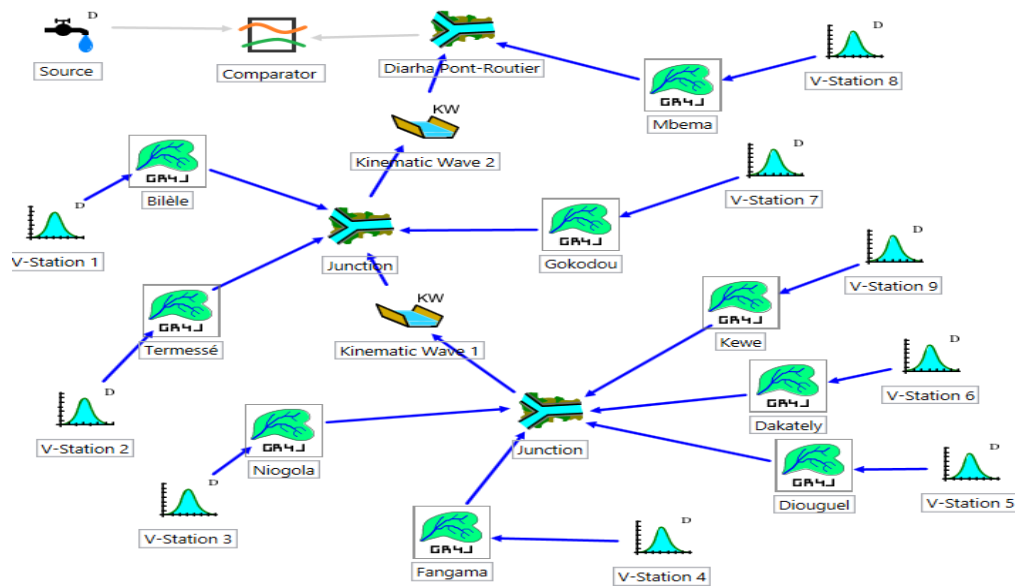


Figure.181. Topology of the full model GR4J: production, transfer then transport

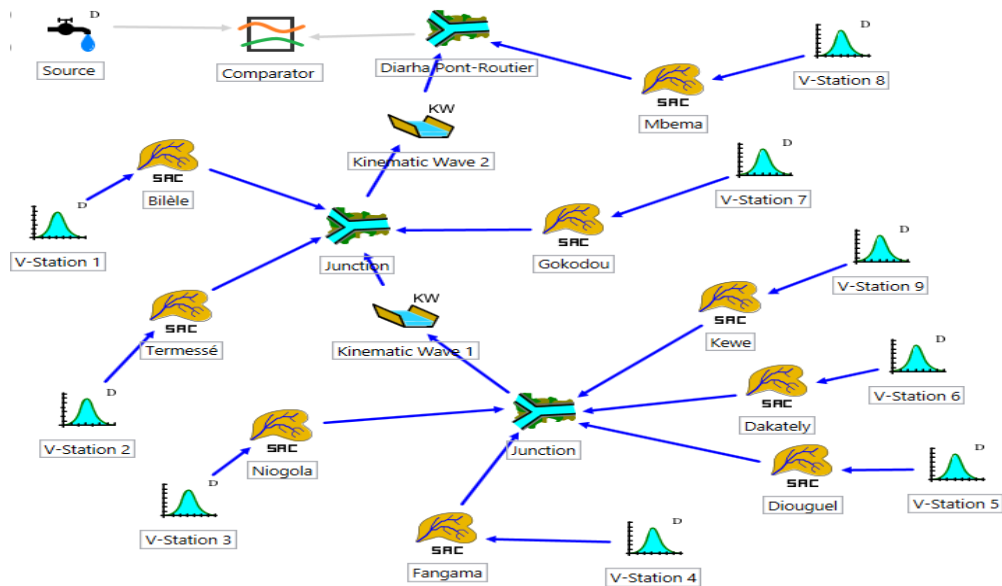


Figure.182. Topology of the full model SAC-SMA: production, transfer then transport

2.3. Methods

In this study, two hydrological models of RS Minerve (GR4J and SAC-SMA) were compared. The model that best reproduced the hydrographs observed during the calibration (1975-1992) and validation (1998-2003) phases was used to reconstruct flow data that was missing for the Diarha over three periods (1961-1974; 1993-1997 and 2004-2012). This enabled consideration of a continuous period of discharges from 1961 to 2012. In addition, the same model was used to project future flows (horizon 2050) to anticipate the impact of climate change on surface water resources of the Diarha catchment. CORDEX simulations produced climate outputs that were subject to three RCM (IPSL-CM5A-LR, INM-CM4, and GFDL-ESM2G). In addition, characteristic high (DCC) and low (DCE) flow rates were applied to projected climate scenarios through 2050.

2.3.1. Structure of Hydrological Models

GR4J hydrological model

The GR4J model (Perrin *et al.* 2003) is based on two reservoirs (production and routing) and two unitary hydrographs (UH1 and UH2). The model simulates flows through the production and transfer functions (Figure 183). It first neutralizes equivalent daily rainfall (Peq) by potential daily evapotranspiration to determine net rain (Pn) and net evapotranspiration (En) (Garcia Hernandez *et al.* 2018):

$$\begin{aligned} Pn &= P_{eq} - ETP \\ En &= 0 & \text{Si } P \geq ETP \\ Pn &= 0 & \text{Si } P < ETP \\ En &= ETP - P_{eq} \end{aligned} \quad (31)$$

When Pn deviates from zero, a part of Pn denoted (Ps) feeds the production reservoir (S) as presented in equation 32. Similarly, if En is not zero, the evapotranspiration of the production reservoir (Es) is calculated as a function of the level of water contained in Ps as described in equation 33.

$$Ps = \frac{d}{dt} \frac{X1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{Pn \cdot dt}{X1}\right)}{1 + \left(\frac{S}{X1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{Pn \cdot dt}{X1}\right)} \quad (32)$$

$$Es = \frac{d}{dt} \frac{S \cdot \left(2 - \left(\frac{S}{X1}\right)\right) \cdot \tanh\left(\frac{En \cdot dt}{X1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{En \cdot dt}{X1}\right)} \quad (33)$$

Where

Ps=intensity of the rain feeding the production reservoir

X1=maximum capacity of the production reservoir;
 S=water content in the production reservoir
 Es=evapotranspiration of the production reservoir.

The percolation (iPerc) from the production reservoir is therefore calculated as:

$$iPerc = \frac{d}{dt} (S + (Ps - Es).dt). \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} \cdot \frac{S + (Ps - Es).dt}{X1} \right)^4 \right) - \frac{1}{4} \right) \quad (34)$$

The variation of the production reservoir (S) is:

$$\frac{dS}{dt} = Ps - Es - iPerc \quad S \geq 0 \quad (35)$$

The amount of water routed to the routing reservoir (iPr) is determined by:

$$iPr = iPerc + (Pn - Ps) \quad (36)$$

where 90% of iPr is transported by unit hydrograph (UH1) and by the routing reservoir and the remaining 10% by a second unit hydrograph (UH2).

Four parameters are used to calibrate the model:

X1= the size of the production reservoir
 X2= exchanges between surface water and groundwater (if X2 <0, groundwater feeds runoff and vice versa if X2 > 0, runoff feeds groundwater)
 X3= maximum capacity of the transfer reservoir
 X4= the base time of the flood (Figure 183) on which the two unit hydrographs UH1 and UH2 depend.

A more detailed description of the GR4J model is available in the RS Minerve software technical manual (Garcia Hernandez *et al.*, 2018) and in Perrin *et al.* (2003).

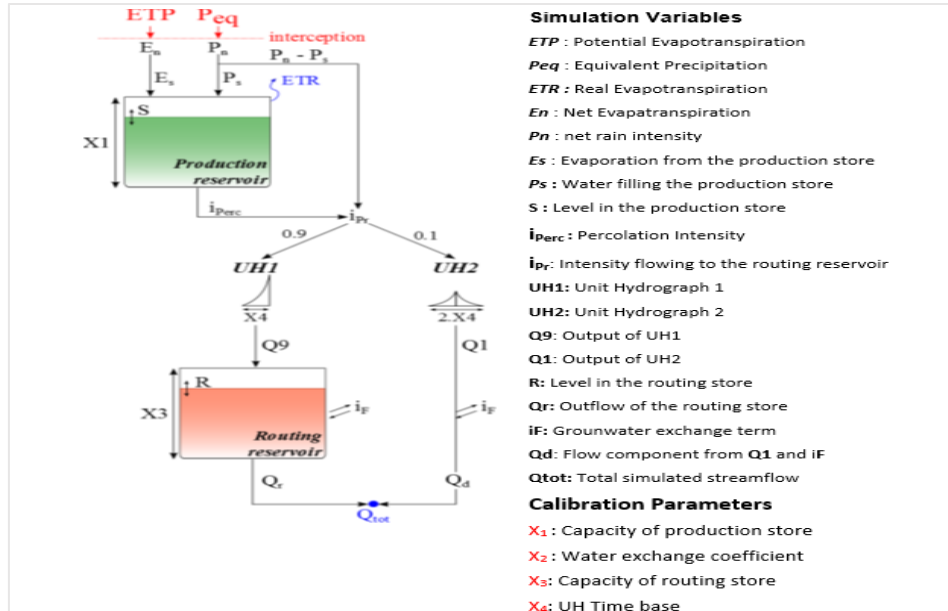


Figure.183. Conceptual scheme of the GR4J model (Garcia Hernandez *et al.* 2018)

SAC-SMA hydrological model

SAC-SMA or SACRAMENTO (Figure 184) is a semi-distributed conceptual model, developed in the 1970s (Burnash *et al.*, 1973, Burnash, 1995) to facilitate the simulation of river flows by optimizing soil moisture and percolation. It is widely used for flood forecasting in river forecast centers across the United States. Satisfactory results in hydrological modeling are demonstrated by Ajami *et al.* (2004); Anderson *et al.* (2006); Gan and Burges (2006); Laura *et al.* (2016). The model runs on a daily basis with rain and ETP as input data. The ability of the model to simulate flow rates depends primarily on the initial parameters and conditions presented in Table 82.

Table.82. Initial parameters and conditions of the SAC-SMA model

Object	Name	Units	Description	Regular Range
SAC-SMA	S	Km ²	Area of the watershed	>0
	Adimp	-	Maximum fraction of an additional impervious area due to saturation	0 to 0.2
	Pctim	-	Permanent impervious area fraction	0 to 0.05
	Riva	-	Riparian vegetation area fraction	0 to 0.2
	UztwMax	mm	Upper Zone Tension Water capacity	0.01 to 0.15
	UzfwMax	mm	Upper Zone Free Water capacity	0.005 to 0.10
	Uzk	1/d	Interflow depletion rate from the Upper Zone Free Water storage	0.10 to 0.75
	Zperc	-	Ratio of maximum and minimum percolation rates	10 to 350
	Rexp	-	Shape parameter of the percolation curve	1 to 4
	Pfree	-	Percolation fraction that goes directly to the Lower Zone Free Water storage	0 to 0.6
	LztwMax	mm	Lower Zone Tension Water capacity	0.05 to 0.40
	LzfpMax	mm	Lower Zone primary Free Water capacity	0.03 to 0.80
	LzfsMax	mm	Lower Zone supplementary Free Water capacity	0.01 to 0.40
	Rserv	-	Fraction of Lower Zone Free Water not transferable to Lower Zone Tension Water	0 to 1
	Lzpk	1/d	Depletion rate of the Lower Zone primary Free Water storage	0.001 to 0.03
	Lzsk	1/d	Depletion rate of the Lower Zone supplemental Free Water storage	0.02 to 0.3
	Side	-	Ratio of deep percolation from Lower Zone Free Water storage	0 to 0.5
	Adimlni	mm	Initial Tension Water content of the Adimp area	-
	Uztwni	mm	Initial Upper Zone Tension Water content	-
	Uzfwni	mm	Initial Upper Zone Free Water content	-
	Lztwni	mm	Initial Lower Zone Tension Water content	-

LzfpIni	mm	Initial Lower Zone Free supplementary content	-
LzfsIni	mm	Initial Lower Zone Free primary content	-

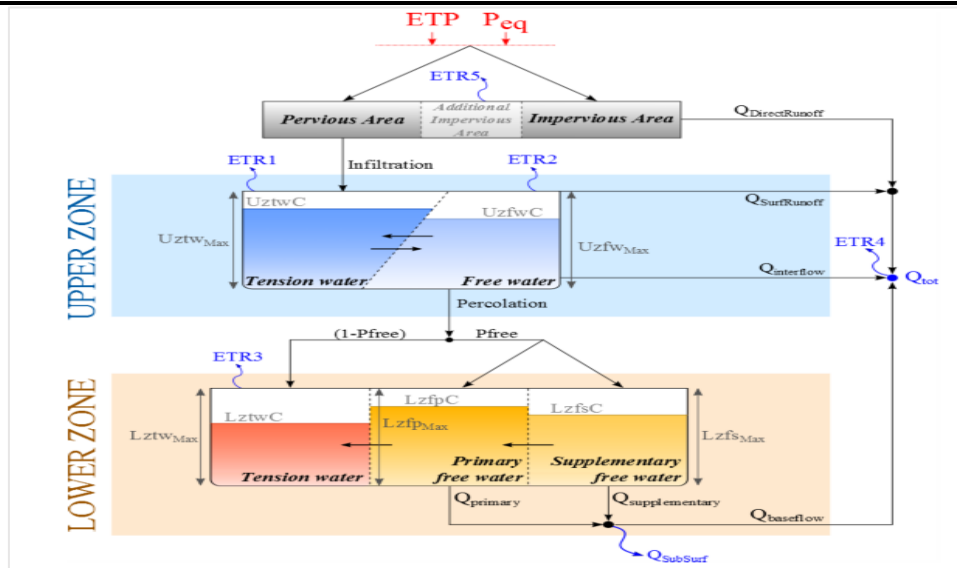


Figure.184. Conceptual scheme of the SAC-SMA model (Garcia Hernandez *et al.* 2018).

2.3.2. Optimization of hydrological models

The automatic optimization of the models is based on the use of a multi-criteria function which aggregates the Nash, Nash-ln, KGE' and R (Table 83) criteria, to avoid the biases that could result from the use of just one criterion (Nash).

Table.83. Performance indicators

Criterion	Formula	Scale	Idea value
Nash (NSE)	$1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Xsim, t - Xref, t)^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (Xref, t - \bar{X}ref)^2}$	$-\infty$ to 1	1
Nash-ln	$1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Xsim, t) - \ln(Xref, t))^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Xref, t) - \ln(\bar{X}ref))^2}$	$-\infty$ to 1	1
Pearson (R)	$\frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Xsim, t - \bar{X}sim) \times (Xref, t - \bar{X}ref)}{\sqrt{\sum_{t=ti}^{tf} (Xsim, t - \bar{X}sim)^2 \times \sum_{t=ti}^{tf} (Xref, t - \bar{X}ref)^2}}$	-1 to 1	1
KGE' (modified KGE-statistic)	$1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$	0 to 1	1

Nash is the Nash-Sutcliffe coefficient; **Xsim,t** is the simulated flow at time step **t**; **Xref,t** is observed flow at time step **t**; **KGE'** is modified KGE-statistic; **R** is correlation coefficient between simulated and reference flow; **β** is ratio between the mean of the simulated flows and the mean of reference ones; **γ** is variability ratio (ratio between the coefficient of variation of the simulated flows and the coefficient of variation of the reference ones).

The Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA) method was used for the automatic calibration of models. SCE-UA is a global optimization method (Duan *et al.*, 1992) based on the best characteristics of several algorithms (Kan *et al.*, 2016) and on the Nelder-Mead (1965) simplex method for linear operations. This approach was developed to improve the calibration of hydroclimatic models (Ajami *et al.*, 2004, Muttill and Liong, 2004, Blasone *et al.*, 2007) -- in this case, rainflow conceptual models (CRR models). It has recently been applied successfully to watershed resource management (Zhu *et al.*, 2006, Liu *et al.*, 2008, Jeon *et al.*, 2014). SCE-UA synthesizes several techniques: (i) combining probabilistic and deterministic approaches, (ii) systematic evolution of a complex of points covering the parameter space, (iii) competitive evolution and, (iv) the Shuffling complex. Numerous studies using different CRR models, including hydrological (HYMOD), six parameter (SIX-PAR) and SAC-SMA (Duan *et al.* 1992, Sorooshian *et al.* 1993, Eckhardt and Arnold 2001) have shown that SCE-UA is an efficient, consistent and flexible algorithm for the automatic calibration of environmental models.

SCE-UA optimization is based on the number of objective criteria selected and the maximum number of iterations (MAXN) until the optimal value is reached, based on a defined Objective Function (OF). A random draw of 7,000 combinations of parameters for each model is then run to identify optimal values. Finally, 295 iterations of the functions of production and transfer by the models were run, to which local adjustment of the parameters were applied. This process allows a choice of model parameters to best reflect the relationship of rain to flow.

2.3.3. Downscaling of Regional Climate Models

In this study the CDF-t method developed by Michelangeli *et al.* (2009) is used to adjust the regional climate models IPSL-CM5A-LR, INM-CM4, and GFDL-ESM2G produced by CORDEX climate projections. According to Famien *et al.* (2018), this method consists of matching the CDF of a climate variable simulated by a model to the CDF of the same variable in observations through a mathematical function (the transform). The CDF-t approach can be considered an extension of Q-matching, because it directly provides CDFs. Instead of applying the quantile-quantile correction (Déqué, 2007), it takes into account only the probability distribution. The CDF-t adjusts model outputs based on the historical data and gauge observations of transformations from the CDFs. The method assumes a transformation (T) that allows translation of the CDF of a GCM/RCM variable to be the predictor of the CDF

representing local climate at a given weather station (Michelangeli *et al.*, 2009). F_{Sh} stands for the CDF of observed and historical daily temperature/precipitation data, and F_{Gh} stands for the CDF of model outputs at a given grid cell for the same period. F_{Gf} and F_{Sf} are the CDF equivalent to F_{Gh} and F_{Sh} but for a future period.

$$T(F_{Gh}(x)) = F_{Sh}(x) \quad (37)$$

Define $u = F_{Gh}(x)$ and thus $x = F^{-1}_{Gh}(u)$ with $u \in [0, 1]$. Replacing (x) in Eq.7 allows the following definition for transform T :

$$T(u) = F_{Sh}(F^{-1}_{Gh}(u)) \quad (38)$$

In which T denotes the functional relationship between the CDF of observation and simulation results over a historical period. Thus, assuming that relationship in Eq.38 will remain valid in the future, and the corrected CDF is given by:

$$F_{Sf}(x) = F_{Sh}(F^{-1}_{Gh}(F_{Gf}(x))) \quad (39)$$

As with all methods, CDF-t results and technical constraints have their strengths and weaknesses. An important advantage of CDF-t is that it has been extensively tested and referenced in various publications since 2009 (Michelangeli *et al.*, 2009; Vrac *et al.* 2012; Vigau *et al.*, 2013; Vrac *et al.*, 2015; Grouillet *et al.*, 2016; Vrac *et al.*, 2016; Famien *et al.*, 2018). The Regional Climate Models used in this study are presented in Table 84. They are bias corrected at the scale of West Africa within CORDEX climate projections (Famien *et al.*, 2018).

Table.84. Regional Climate Models (RCM) used in this study

Modeling Center or Group	Model Name	Resolution	Scenarios RCP	Present Period	Historical	Future Period
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Institute for Numerical Mathematics Institute Pierre-Simon Laplace	GFDL-ESM2G	0.5° x 0.5°	4.5 and 8.5	1961-2012	1950-2005	2020-2050
	INM-CM4	0.5° x 0.5°	4.5 and 8.5	1961-2012	1950-2005	2020-2050
	IPSL-CM5A-LR	0.5° x 0.5°	4.5 and 8.5	1961-2012	1950-2005	2020-2050

3. Results

3.1. Efficiency of the SAC-SMA model in cross-validation phase

The comparison of observed and simulated hydrographs shows that the SAC-SMA model reproduces average flows of the Diarha better than it does low flows and flood peaks. Parameters calibrated between 1975 and 1992 give the best Nash criteria (0.89 for calibration and 0.62 for validation; the Nash calculated from the logarithm (Nash-ln) ranges from 0.52 (calibration) to 0.37 (validation)).

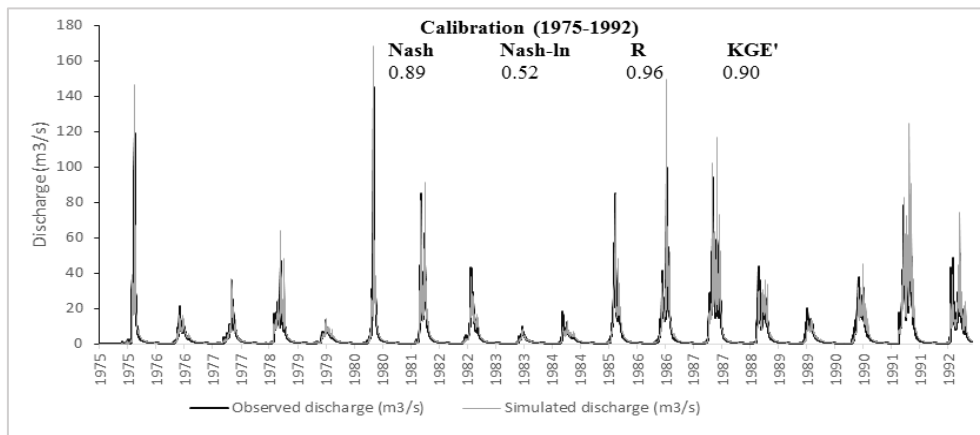


Figure.185. Calibration of the SAC-SMA model over the period 1975-1992

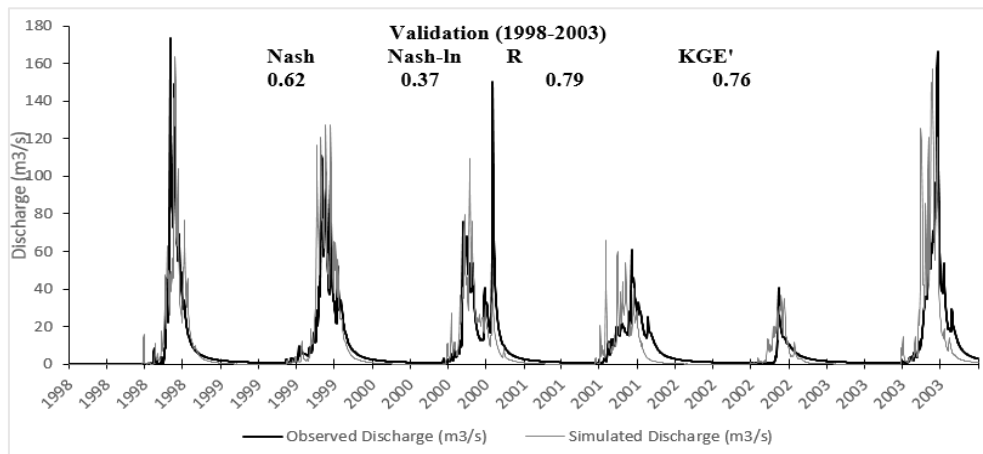


Figure.186. Validation of the SAC-SMA model over the period 1998-2003

3.2. Efficiency of the GR4J model in cross-validation phase

Performance criteria calibrated with the GR4J model over the calibration (1975-1992) and validation (1998-2003) periods show good superimposition of the observed and simulated daily hydrographs. The calculated Nash logarithm (Nash-ln) gives the best results (0.96 for calibration and 0.90 for validation). Pearson (R) and Kling Gutpa Efficiency (KGE') values are greater than 80% in both calibration and validation. These criteria (R and KGE'), although very sensitive to extreme values (Legates and McCabe, 1999), remain good indicators for the

simulation of Diarha streamflows. The output for calibration (1975-1992) and validation (1998-2003) shows that the GR4J model has been well calibrated to simulate future flows.

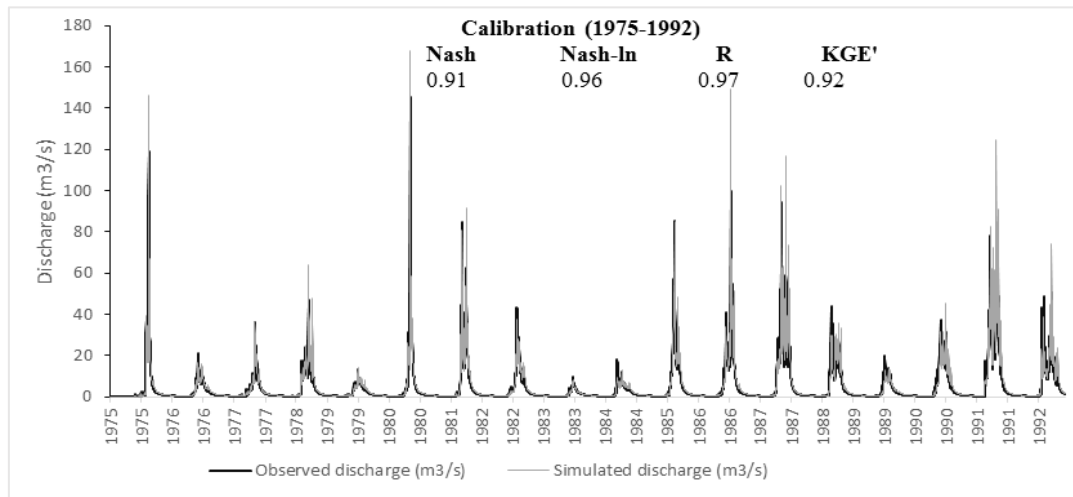


Figure.187. Calibration of the GR4J model over the 1975-1992 period

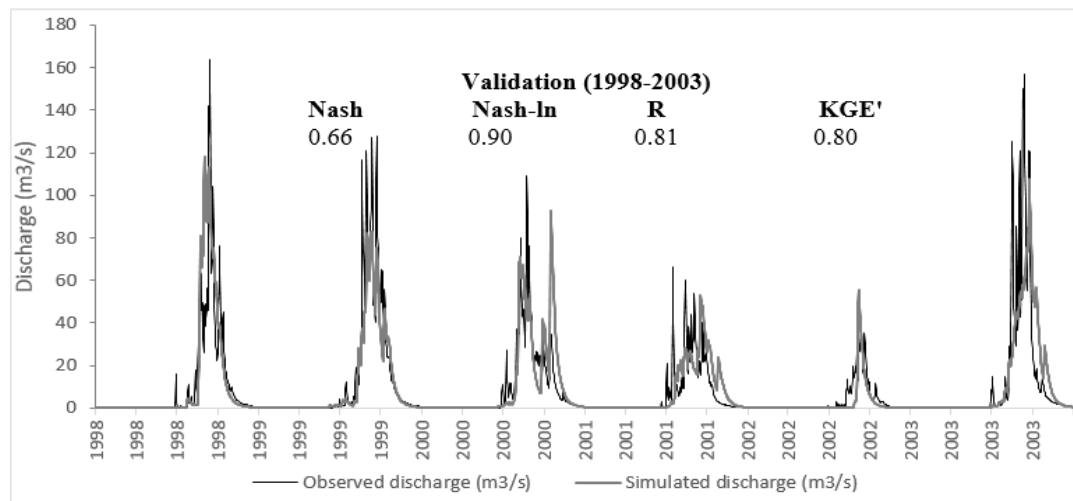


Figure.188. Validation of the GR4J model over the period 1998-2003

Results indicate that the GR4J model reproduces the observed Diarha flow more accurately than does the SAC-SMA model. For this reason, parameters (X1, X2, X3 and X4) of its 1975-1992 calibration period were used to reconstruct the missing flows over the periods 1961-1974; 1993-1997 and 2004-2012 (Figure 189).

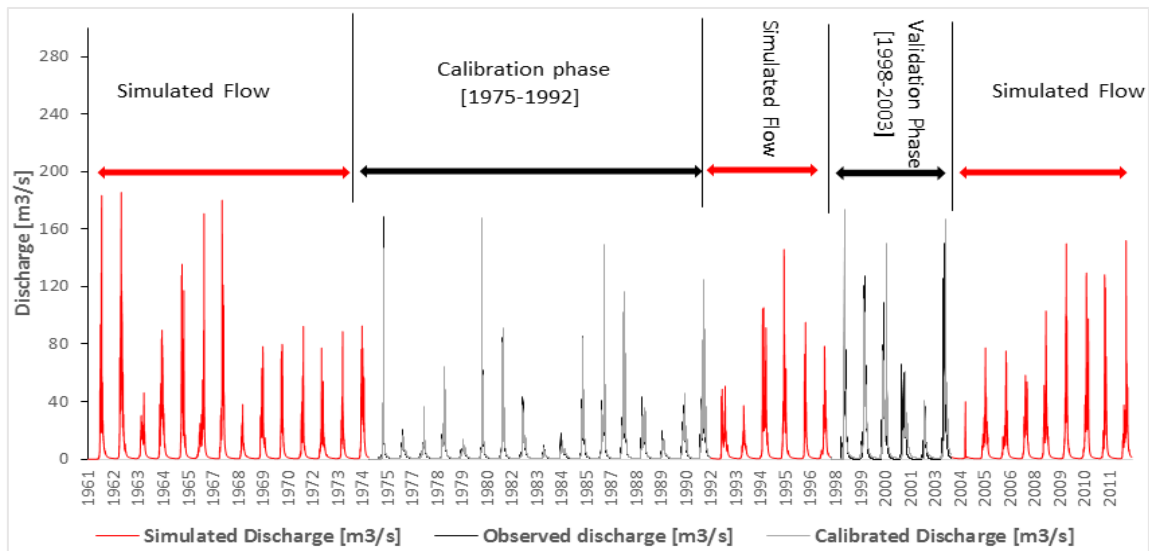


Figure.189. Observed and simulated daily hydrograph of Diarha

Buishand's test (Buishand, 1982) and Hubert's segmentation method (Hubert *et al.*, 1998) were applied to streamflow chronicles to analyze their stability, using KhronoStat software (IRD, 1998). Results indicate that the streamflow series of the Diarha is not stationary, exhibiting several breaks as revealed by the segmentation of Hubert (Table 85) and the Bois ellipse (Figure 190).

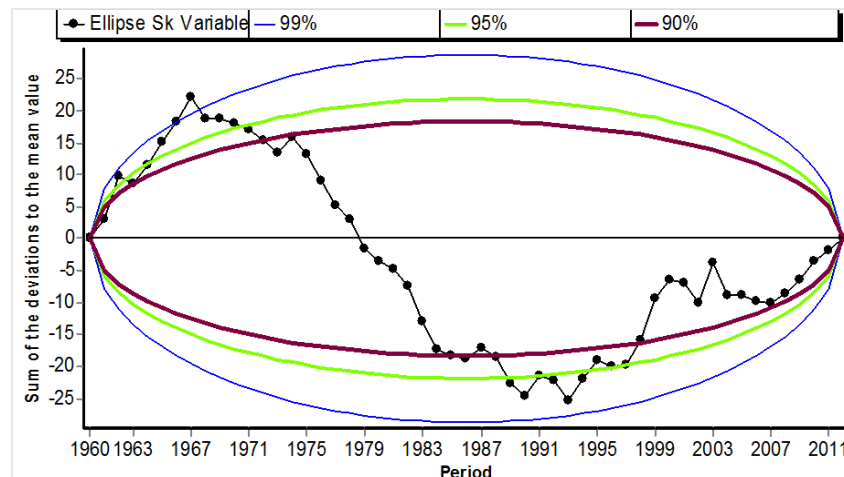


Figure.190. Demonstration of the presence of rupture at all thresholds of confidence by the Bois' Ellipse on the annual flows of Diarha.

Analysis of the results of Hubert's segmentation shows that the annual mean flows of Diarha show breaks over three different dates (1967, 1993 and 2012). The streamflow evolution is summarized in three phases:

- a wet phase (1961-1967) with an average annual flow of $9.82 \text{ m}^3/\text{s}$;
- a dry phase (1968-1993) with an average flow of $6.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{year}$;
- and a new wet phase (1994-2012), with an average flow of $8.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{year}$.

Table.85. Segmentation of the annual flow series of the Diarha Basin

Beginning	End	Mean discharge (m ³ /s)
1961	1967	9.82
1968	1993	6.01
1994	2012	8.2

3.3. Future Temperature and Precipitation Changes

The Cumulative Distribution Function transformation (CDFt) was applied to daily temperature and precipitation data to assess the capacity of regional climate models (INM-CM4, GFDL-ESM2G and IPSL-CM5A-LR) to forecast precipitation and temperature of the Diarha catchment. This method has been applied in several studies to correct the extreme signals of climate models (Guo, 2018; Mbaye *et al.*, 2018).

Results show that the CDFt method effectively corrects the variation of future temperature (Figure 191) and rainfall (Figure 192) of the Diarha catchment.

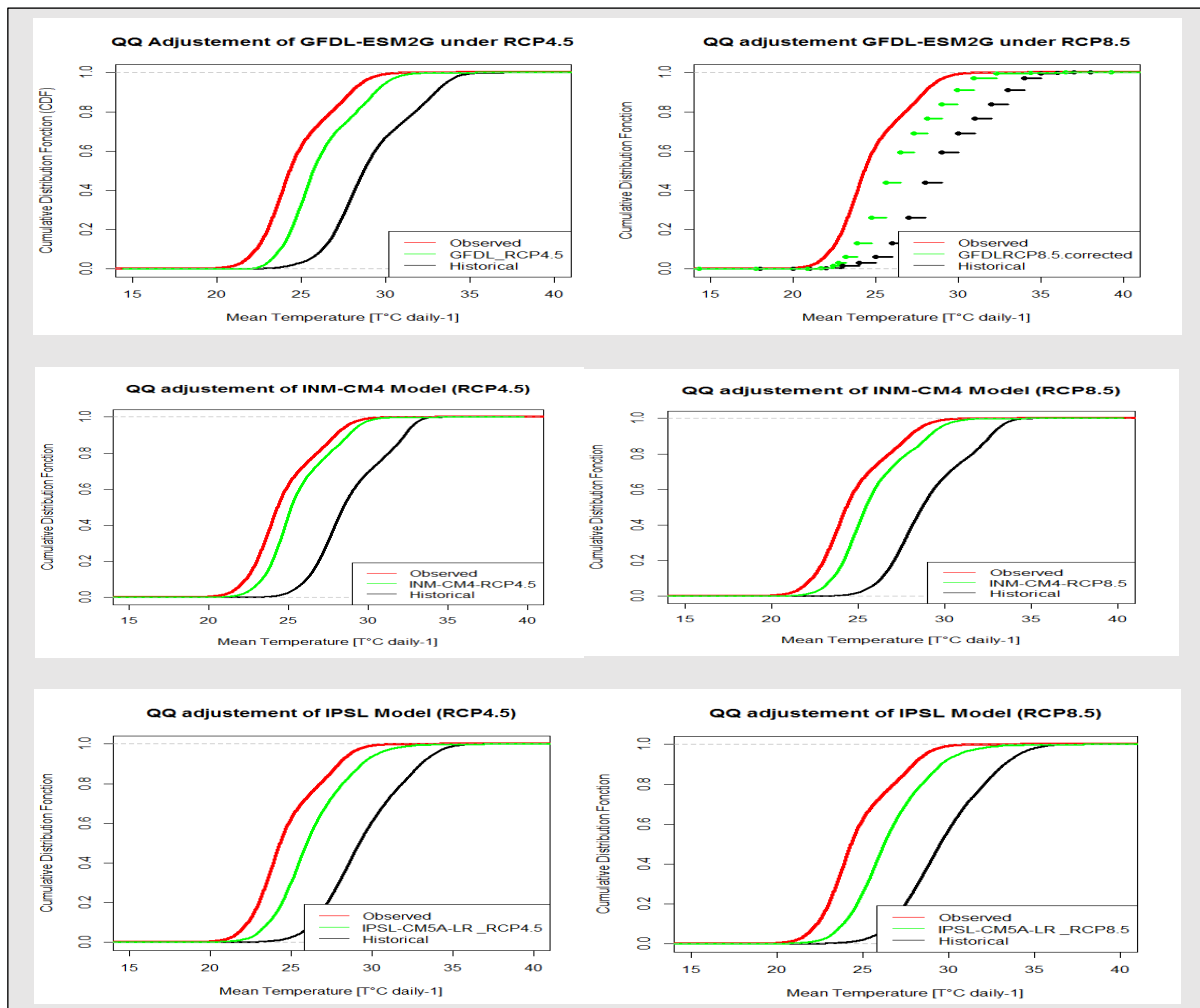


Figure.191. Temperature biases corrected under RCP4.5 and RCP8.5

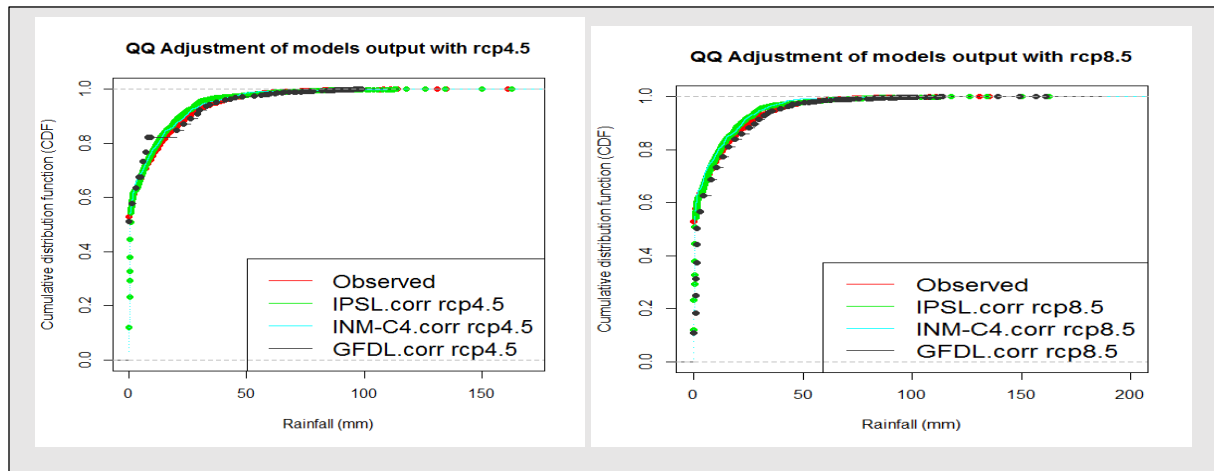


Figure.192. Precipitation biases corrected under RCP4.5 and RCP8.5

The IPSL-CM5-A-LR, INM-CM4 and GFDL-ESM2G models predict, under the RCP4.5 scenario, an increase in mean temperatures of 1.4°C; 1.7°C and 0.9°C, respectively in 2050 horizon. This increase is more pronounced under the RCP8.5 scenario, in which the same models forecast an increase of 1.99°C; 2.04°C and 1.09°C, respectively, in 2050.

The CDFt projection shows that in both the RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios, there is a downward trend in rainfall in the Diarha catchment. Compared to the period 1961-2012, precipitation is expected to decrease in 2050 by between 2.1% (RCP4.5) and 12% (RCP8.5), signaling that the warming and decreased precipitation that results from climate change will probably affect the hydrology of the Diarha watershed.

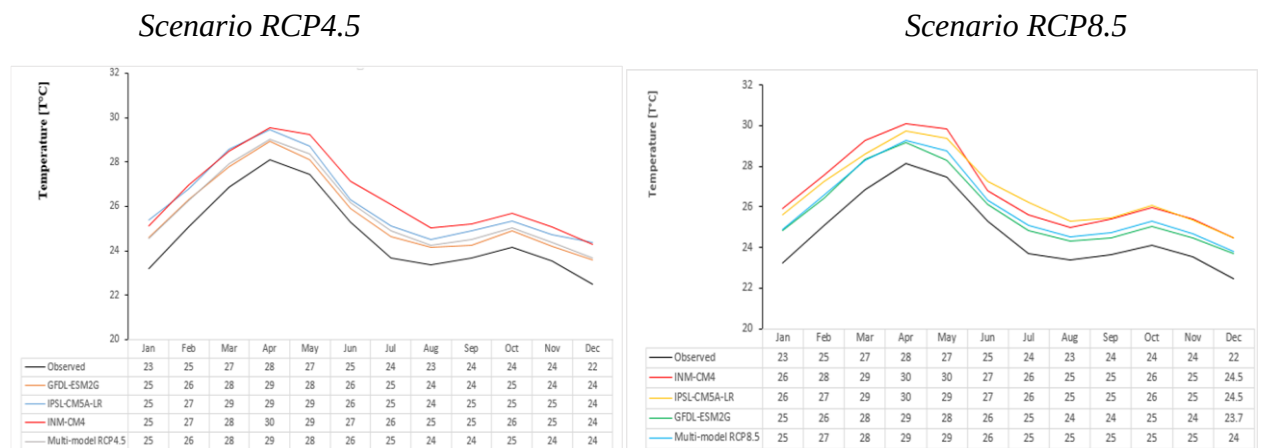


Figure.193. Projected average temperatures of the Diarha basin under RCP4.5 and RCP8.5

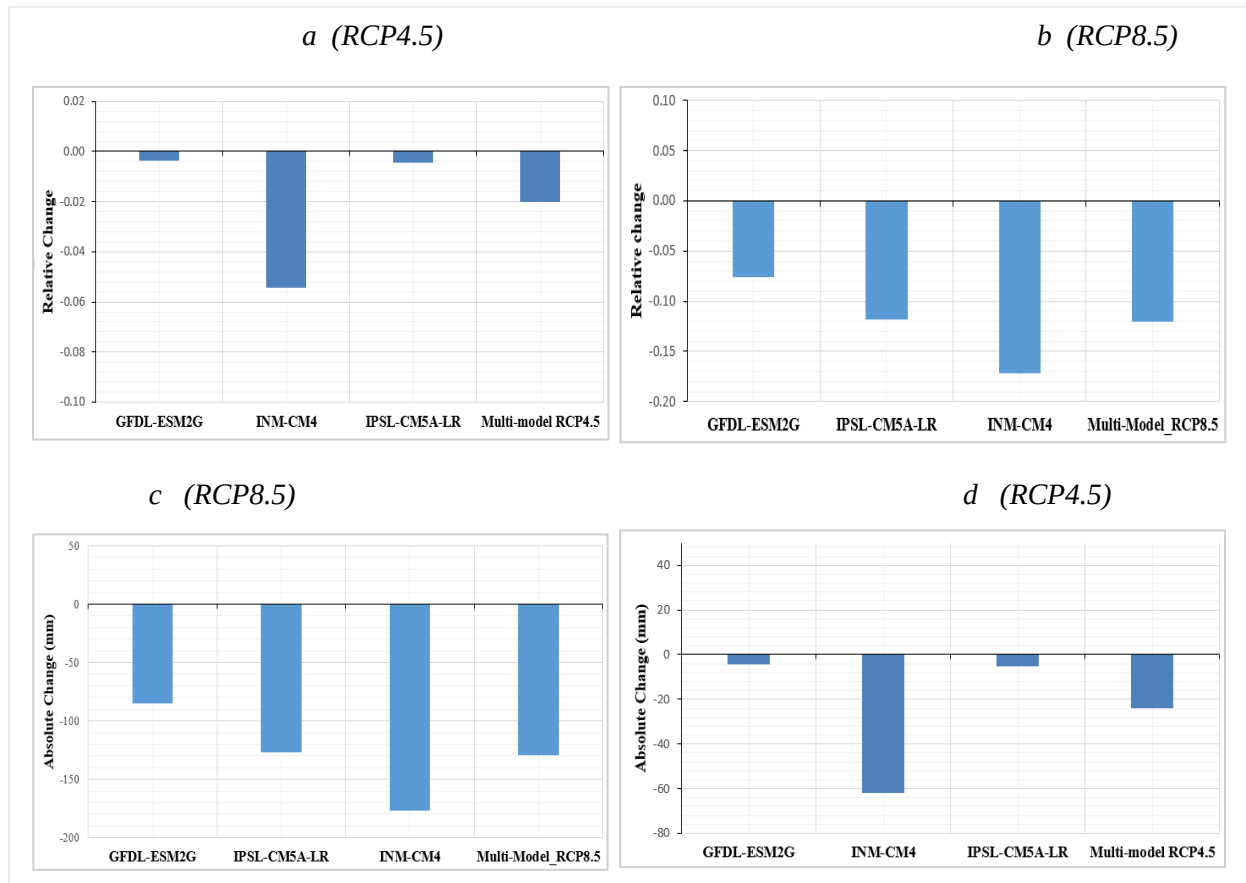


Figure. 194. Relative (a, b) and Absolute (c, d) changes of annual rainfall for the Diarha River under RCP4.5 and RCP8.5

3.4. Evolution of Annual Streamflow and Characteristic Flow Rates by 2050

The corrected outputs of Regional Climate Models (RCM) were submitted to the GR4J model to simulate the evolution of Diarha streamflows by 2050. Compared to the 1961-2012 reference period, the GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-LR and INM-CM4 models predict a decrease in streamflows of 0.5%, 1.5% and 12.4%, respectively.

For the RCP8.5 scenario, the decrease in precipitation as well as that of flows is more severe. Models predict a decrease in precipitation of 7.6% (GFDL-ESM2G) to 17.2% (INM-CM4). For flows, the same models predict a decrease of 16% to 35%. The overall average RCP8.5 model predicts a decrease in rainfall of 12%, which translates as a reduction in the flow of the Diarha of 25% (Figures 195, 196). These results show how streamflow forecasting is highly sensitive to the quality of RCM output data.

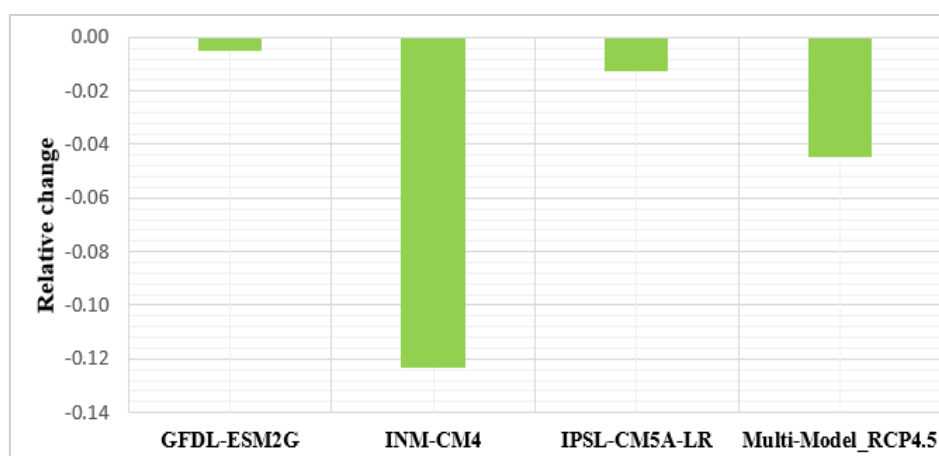


Figure 195. Relative change of mean annual flow for the Diarha River under RCP4.5

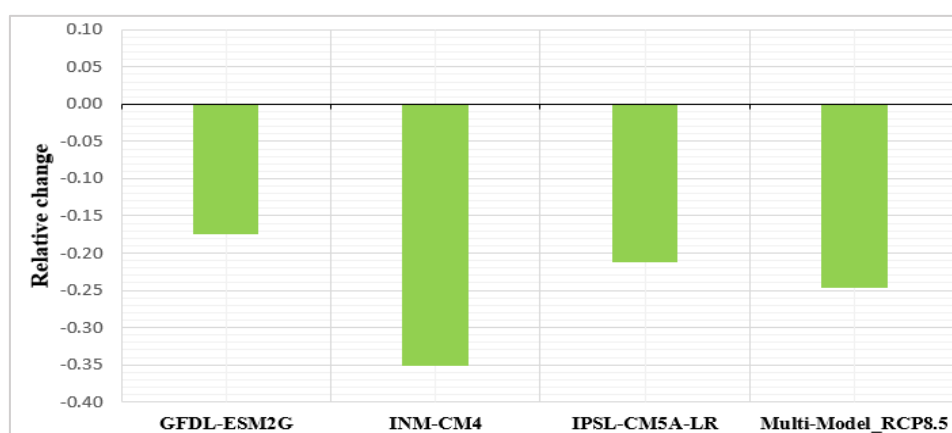


Figure 196. Relative change of mean annual flow for the Diarha River under RCP8.5

In addition, Diarha's high (DCC) and low (DCE) characteristic flow rates were forecast for 2050 climate scenarios, as compared to the 1961-2012 reference period. Table 86 presents the characteristic flow rates used; Appendices A (RCP4.5) and B (RCP8.5) show the relative projected changes in DCC and DCE under their respective scenarios. Figures 197 and 198 show the variation of the projected DCC and DCE (in RCP4.5 and RCP8.5 scenarios) for the different RCM, compared to the reference period 1961-2012.

Table.86. Characteristics flow rates used.

Characteristic	Acronym	Description
High flow	DMAX	Maximum Daily flow
	DCC_10j	Characteristic flood flow exceeded 10 day per year
	DCC_20j	Characteristic flood flow exceeded 20 day per year
	DC1	Characteristic flow exceeded 1 months in the year
	DC2	Characteristic flow exceeded 2 months in the year
	DC3	Characteristic flow exceeded 3 months in the year
	DC4	Characteristic flow exceeded 4 months in the year
	DC5	Characteristic flow exceeded 5 months in the year

	Median	Flows exceeded six months in the year
Low flow	DC7	Characteristic flow exceeded 8 months in the year
	DC8	Characteristic flow exceeded 8 months in the year
	DC9	Characteristic flow exceeded 9 months in the year
	DC10	Characteristic flow exceeded 10 months in the year
	DC11	Characteristic flow exceeded 11 months in the year
	DCE_20j	Characteristic low flow on a 20-day period
	DCE_10j	Characteristic low flow on a 10-day period
	DMIN	Minimum Daily flow

The simulation results project a reduction of 9% (GFDL-ESM2G model) to 59% (INM-CM4 model) of the maximum daily flow rates (DMAX) under the RCP4.5 scenario. Only the IPSL-CM5A-LR model forecasts a slight increase of 7%. The RCP4.5 multi-model set (average of the three RCM) predicts a 15% and 14% decrease in peak flows achieved or exceeded for 10 days (DCC_10j), 14% for 20 days (DCC_20j), 16% for one month (DC1), 20% for two months (DC2) and 7% for three months (DC3). However, all models forecast an increase of 23%, 42% and 50% of the characteristic flows reached or exceeded for four months (DC4), five months (DC5) and six months (median flow), respectively, for the period 2020-2050. Low flow (DC7, DC8, DC9, DC10, DC11, DCE_20j, DCE_10j, and DMIN) models project an average increase of 59% under the scenario RCP4.5.

The decrease in characteristic rates is more pronounced under the RCP8.5 scenario. The GFDL-ESM2G and INM-CM4 models predict a decrease of 35% and 47% in DMAX; 24% and 97% (DCC_10j); 30% and 93% (DCC_20j); 27% and 98% (DC1); 27% and 63% (DC2); and 4% and 11% (DC3), respectively. Model IPSL-CM5A-LR, predicts a 20% increase in DMAX, and a chronic decrease in DCC_10j (57%), DCC_20j (86%), DC1 (96%) and DC2 (67%), by 2050. Overall averages with RCP8.5 (multi-model-RCP8.5) predicts a decrease of 41% (DMAX), 66% (DCC_10j), 80% (DCC_20j and DC1), 51% (DC2) and 7% (DC3). The models also predict by 2050 an increase of 23%, 32% and 33% of the DC4, DC5 and median flows, respectively.

For low flow characteristic rates (DC7, DC8, DC9, DC10, DC11, DCE_20j, DCE_10j, and DMIN), models predict an average increase of 63% by 2050, under RCP8.5. In sum, the hydrological model submitted to the outputs of regional climate models projects a decrease in DMAX, DCC_10j, DCC_20j, DC1, DC2 and DC3, and an increase in Diarha low flow characteristic rates under both emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). The hydrological model only predicts an increase in DMAX with the outputs of the IPSL-CM5A-LR model under both RCP scenarios.

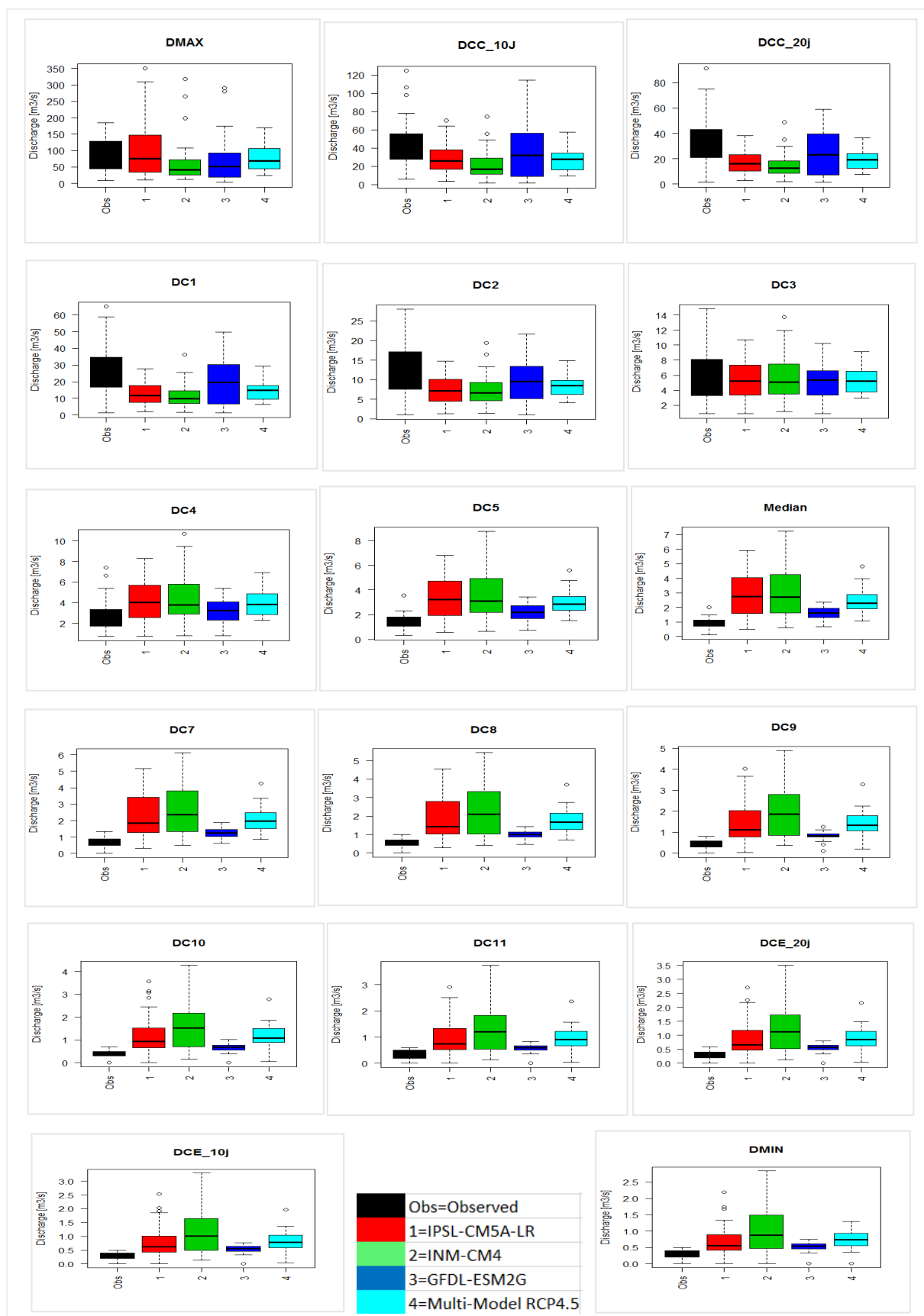


Figure.197. Evolution of characteristic flow rates (DCC et DCE) by 2050 under the RCP4.5 scenario

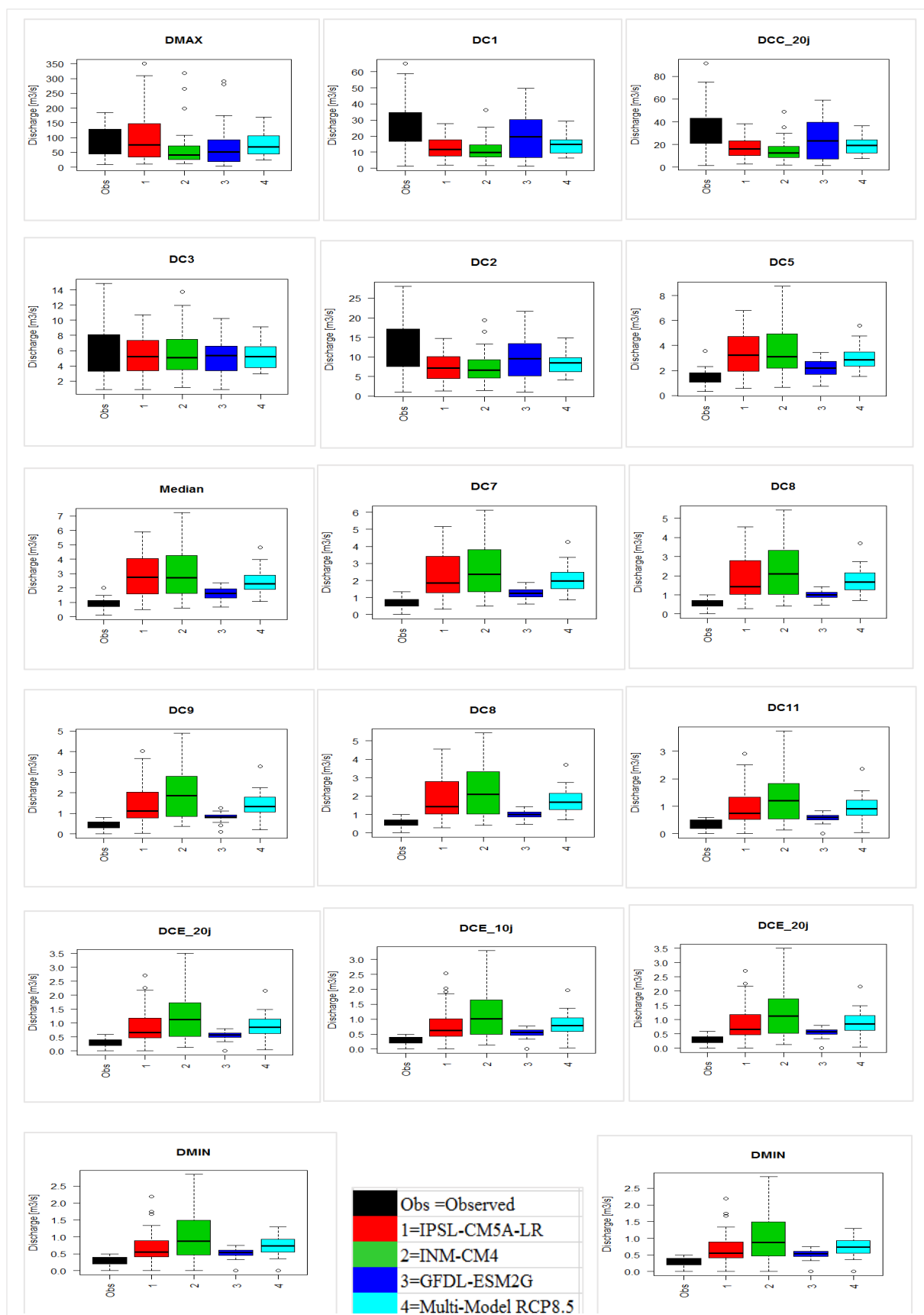


Figure.198. Evolution of characteristic flow rates (DCC et DCE) by 2050 under the RCP8.5 scenario

4. Discussions and Conclusions

Predicting the variation of water volumes in a watershed is essential because it enables planners to assess the correlation between water demand and water availability in order to anticipate and manage potential conflicts among users and sectors. In this study, two hydrological models, GR4J and SAC-SMA, of the RS Minerve were calibrated based on existing rainfall data for the periods 1975-1992 and 1998-2003. Results show that the GR4J model is better correlated with actual observed flow rates of the Diarha over the calibration (1975-1992) and validation (1998-2003) phases. The parameters X1, X2, X3 and X4 were determined based on the calibration period and used to simulate flow rates over the missing periods. This allowed for the extension of data to represent discharges continuously from 1961 to 2012. In addition, randomness verification tests show the absence of stability on Diarha flow chronicles, confirming the sensitivity of climate variables to climate change. (Stanzel *et al.*, 2018). The work of Thiaw (2017) confirms that rainfall series in the Diarha catchment are marked by high interannual variability and long-term fluctuations, from a very wet period between 1921 and 1967 to a very dry period between 1968 and 1990, followed by a return of rainfall starting in the 2000s.

At the same time, it should be noted that flow rates do not depend solely on climate. Several factors related to the hydrological structure of the watershed (geology, pedology, land use, etc.) may also impact model outputs. Unfortunately, the GR4J model, though calibrated in semi-distributed conceptual mode, does not integrate land use dynamics in the flow simulation. In addition, several studies have shown that this model does not fully account for the relationship between groundwater and surface water (Fabré *et al* 2015, Bodian *et al.* 2018). Therefore, depending on the physical characteristics of the basins modeled, the GR4J model overestimates or underestimates low flows and peak flows. There are other hydrological models that better take into account the interaction between groundwater and surface water (Pulido-Velazquez *et al.*, 2007); however, their application at the scale of the Diarha catchment is difficult because of the scarcity of hydrogeological data. Overall, despite its inability to integrate the atmosphere-water-vegetation cycle, the semi-distributed conceptual approach of the GR4J model correlates simulated and observed Diarha hydrographs well.

After calibrating the GR4J model and taking into account the interannual variability of the Diarha flows, the outputs of the RCM (GFDL-ESM2G, INM-CM4 and IPSL-CM5A-LR) of the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) experiment under two Representative

Concentration Pathways (RCP4.5 and RCP8.5) were used to simulate the trend of flows by 2050, compared to the 1961-2012 reference period. The models predict that by 2050 there will be a decrease in annual mean flows of the Diarha compared to the 1961-2012 reference period.

Under the RCP4.5 scenario, the models predict a decrease of 2.1% in precipitation and an average temperature increase of 1.4°C, resulting in a decrease of 5% in Diarha flows. The decrease of precipitation and therefore of streamflow is more pronounced under the RCP8.5 scenario, which estimates a rainfall decrease of 12% and an increase in temperatures of 1.8°C, causing a net decrease of 25% in rainflow. The models project, beyond the decline in annual flows, a decrease in the characteristic flow rates (D_{MAX}, DCC_{10j}, DCC_{20j}, DC₁, DC₂ and DC₃) and an increase in low flows in the two emissions scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). This increase in characteristic low flows (DCE) may be due to the limitation of the hydrological model (GR4J) to model an extremely dry climate.

These results are consistent with those of Bodian *et al.* (2018) in the Gambia River at Mako station, and Senegal River at Bakel station. In that study, the authors used six GCMs (CanESM2, CNRM, CSIRO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES and MIROC5) from CMIP5, and the GR4J model to evaluate the hydrological impact of climate change. They predicted a decline in Senegal's streamflow of 8% (RCP4.5) to 16% (RCP8.5), and a decline in the Gambia' from 22% (RCP4.5) to 26% (RCP8.5) by 2050. In addition, Mbaye *et al.* (2015), using a CORDEX simulation of the regional REMO climate model as input to the MPI-HM hydrological model, found a decline in flows, runoff, ETR, and soil moisture in the upper basin of the Senegal River by 2071-2100, under the scenarios RCP4.5 and RCP8.5. The authors predicted a decline of more than 50% in the water resources of the Senegal River, especially in the northern part.

Furthermore, Setegn *et al.* (2011) used the outputs of nine GCMs under the SRES-A2 emission scenario and the SWAT model to assess the impact of climate change on the water resources of Lake Tana, in Ethiopia. They found a significant decrease in average annual flows by 2080-2100, consistent with the work of Biao, (2017) in the sub-basins Betou and Bonou of the Oueme River in Benin. In that study, the HyMoLAP hydrological model was submitted to the outputs of the HIRHAM5 and RCA4 climate models under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios to assess the hydrological impact of climate change. It noted, under the RCP4.5 scenario, a drop in river flows with a magnitude ranging respectively from 25% to 39% and from 20% to 37% by 2020

(2011-2040), 2050 (2041-2070) and 2080 (2071-2100), and a drop between 15% and 34%; and 18% to 36% over the same time horizons under the RCP8.5 scenario.

On the other hand, these results contradict the work of Azari *et al.* (2015) in the Gorganroud watershed of Iran. To simulate the hydrological impact of climate change on this basin, the authors submitted the outputs of the A1F1, A2 and B1 emission scenarios to the SWAT model. They found an increase in mean annual flow of the Gorganroud of 5.8% (A1F1), 2.8% (A2) and 9.5% (B1). In addition, Ardoin-Bardin *et al.* (2009), using a hydrological model at monthly intervals (GR2M), using GCM outputs (CSIRO-Mk2, ECHAM4, HadCM3 and NCAR-PCM) from the IPCC third report, underscored the failure of these climate models to reproduce actual precipitation volumes in the Sahelian zone as well as their failure to simulate the seasonal dynamics of rainfall in the Guinean zone. For this reason, these studies used two climate scenarios based on the variations predicted by the HadCM3-A2 model to generate precipitation and ETP data to the end of the 21st century. These data then became inputs to the GR2M model to assess the future impacts of climate change on the flows of the Senegal, Gambia, Sassandra and Chari rivers. The results indicate a drop in flows from the Gambia and Senegal rivers and an increase in the Sassandra and Chari rivers. Variables such as the differences between rainfall-flow models, the quality of Global/Regional Climate Models used, and the geography under study (difference in climate, soil, relief, land use, etc.) can be decisive factors. Future studies should use rainfall-flow models that integrate, in addition to the climate, other variables that impact the hydrological dynamics of a watershed (hydrogeology, topography, pedology, land use, etc.), for example, the HEC-HMS and SWAT models.

This study demonstrates the negative impact of climate change, especially for characteristic high flows (DCC), and suggests the importance of integrating analysis into adaptive management programs. These results will be useful to decision-makers of the Gambia River Basin Development Organization (OMVG) and the Support Program for Agricultural Development and Rural Entrepreneurship (PADAER) to build and improve adaptive water resource management practices in the context of climate change. However, assumptions based on these results should be cautious due to weak monitoring networks in the Diarha river basin. Future studies would benefit from the implementation of a robust monitoring network to provide more reliable data on water resources in order to improve approaches for long-term exploitation and sustainable management. Also, this research has not specifically studied the

impact of climate change-related changes in streamflow and characteristics in relation to the water demand-availability balance. Future studies should examine how climate change will impact different users of Diarha's water resources and study the correlation between demand and available water resources in different time horizons and scenarios. This study will serve as a foundation for this future work.

Author Contributions: Ibrahima Thiaw designed the study, developed the methodology and wrote the manuscript. Ibrahima Thiaw and Bakary Faty collected and processed the data, while Abel Vincent Manga, Anastasie Mendy, Honoré Dacosta and Amadou Abdoul Sow read and corrected the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A.

Table A1. Relative change in characteristic high flows for different used RCM under RCP4.5.

River Basin	Flow rates	GFDL-ESM2G	INM-CM4	IPSL-CM5A-LR	Multi-Model_RCP4.5
Diarha river RCP4.5	DMAX	-0.09	-0.59	0.07	-0.20
	DCC_10j	-0.07	-0.26	-0.12	-0.15
	DCC_20j	-0.07	-0.18	-0.18	-0.14
	DC1	-0.06	-0.16	-0.27	-0.16
	DC2	-0.08	-0.19	-0.32	-0.20
	DC3	-0.04	-0.05	-0.12	-0.07
	DC4	0.21	0.24	0.24	0.23
	DC5	0.39	0.41	0.46	0.42
	Median	0.46	0.48	0.57	0.50

Table.A2. Relative change in flows below the median for different chosen RCM under RCP4.5.

River Basin	Flow rates	GFDL-ESM2G	INM-CM4	IPSL-CM5A-LR	Multi-Model_RCP4.5
Diarha river RCP4.5	DC7	0.49	0.52	0.64	0.55
	DC8	0.51	0.54	0.68	0.57
	DC9	0.53	0.53	0.71	0.59
	DC10	0.39	0.52	0.73	0.55
	DC11	0.53	0.54	0.76	0.61
	DCE_20j	0.52	0.54	0.76	0.61
	DCE_10j	0.53	0.54	0.77	0.62
	DMIN	0.54	0.56	0.78	0.63

Appendix B.

Table.A3. Relative change in characteristic high flows for different used RCM under RCP8.5.

River Basin	Flow rates	GFDL-ESM2G	INM-CM4	IPSL-CM5A-LR	Multi-Model_RCP8.5
Diarha river RCP8.5	DMAX	-0.35	-0.47	0.20	-0.21
	DCC_10j	-0.24	-1.17	-0.57	-0.66
	DCC_20j	-0.30	-1.23	-0.86	-0.80
	DC1	-0.27	-1.18	-0.96	-0.80
	DC2	-0.27	-0.63	-0.62	-0.51
	DC3	-0.11	-0.04	-0.07	-0.07
	DC4	0.13	0.29	0.26	0.23
	DC5	0.22	0.38	0.36	0.32
	Median	0.23	0.39	0.36	0.33

Table.A4. Relative change in flows below the median for different chosen RCM under RCP8.5.

River Basin	Flow rates	GFDL-ESM2G	INM-CM4	IPSL-CM5A-LR	Multi-Model_RCP8.5
Diarha river RCP8.5	DC7	0.44	0.74	0.70	0.63
	DC8	0.46	0.76	0.71	0.65
	DC9	0.48	0.78	0.72	0.66
	DC10	0.45	0.77	0.71	0.64
	DC11	0.47	0.77	0.68	0.64
	DCE_20j	0.46	0.75	0.66	0.63
	DCE_10j	0.48	0.74	0.64	0.62
	DMIN	0.49	0.73	0.61	0.61

CHAPITRE VII. IMPACTS ECOLOGIQUES DU CLIMAT

Article scientifique

American Journal of Remote Sensing (AJRS)

2017; 5(4): 30-42

<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajrs>

Doi: 10.11648/j.ajrs.20170504.11

ISSN: 2328-5788 (Print); ISSN: 2328-580X (Online)

Erosive Risk Mapping Method: Application in the Diarha Watershed (Tributary of Gambia River)

Ibrahima Thiaw^{1*} & Honoré Dacosta¹

^[1] Laboratory of Hydrology and Morphology, Cheikh Anta Diop University, P.O. Box 5005, Dakar, Senegal

Email address:

ibrahima4.thiaw@ucad.edu.sn (Ibrahima Thiaw) dacosta.honore@gmail.com (Honoré Dacosta)

Résumé en français

La cartographie du risque érosif est un préalable à une démarche de contrôle de l'érosion. Elle permet de localiser les secteurs les plus vulnérables aux processus érosifs. L'établissement de la carte des risques érosifs résulte de la spatialisation de l'Equation Universelle Révisée de Pertes en Sol (RUSLE). S'il est possible de diminuer considérablement l'érosion hydrique des sols par le biais de techniques culturales adaptées comme la rotation des cultures, le buttage, le billonnage et le paillage, il est d'abord nécessaire de cibler les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire. La modélisation RUSLE permet d'apporter une estimation des particules de sol susceptibles d'être arrachées et de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion hydrique. Cette étude a été menée sur le bassin versant du Diarha pour évaluer les pertes de sol potentielles et cartographier les principaux facteurs impliqués dans les processus d'érosion des sols. Le bassin versant de Diarha, avec une superficie de 759,3 km², s'étend entre 12°15' et 12°40' de latitude Nord et entre 12°20' et 13° de longitude Ouest. Il se situe entièrement dans les formations paléozoïques et protérozoïques du socle Birrimien, lesquelles ont donné naissance, à la suite d'un processus d'altération physico-chimique des roches, à des sols fragiles et vulnérables à l'érosion hydrique. De plus en plus de projets agricoles (SODEFITEX, PADAER...), et l'exploitation minière anarchique s'étendent sur des sols très fragiles. Les résultats montrent que les risques érosifs varient en fonction des gradients climatique et topographique, mais aussi des caractéristiques pédologiques du bassin versant. Les pertes annuelles de sol dans l'ensemble du bassin versant de Diarha sont estimées à 31882 t/an; avec une

dégradation spécifique de 42t/km²/an. Les résultats seront comparés à ceux du bassin de la Gambie à Kédougou qui lui est contigu.

Mots clés : Cartographie des risques, Diarha, Erosion hydrique, Lutte antiérosive, RUSLE

Abstract

Mapping of erosive risks is a prerequisite in an erosion control approach. It makes it possible to locate the sectors most vulnerable to erosive processes. The establishment of the erosive risk map results from the spatialization of the Revised Universal Soil Loss Equation (Rusle). This equation is combined with Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) techniques to estimate and map average rates of soil loss. If it is possible to significantly reduce soil water erosion through adapted farming techniques such as crop rotation, milling, banding and mulching, it is first necessary to target strong erosion requiring priority intervention. This study was conducted in the Diarha watershed and its sub-basins to assess potential soil losses and map the main factors involved in soil erosion processes. The results show that the erosive risks vary according to climatic and topographic gradients but also soil characteristics of the watershed. Potential soil losses vary between 0 and 1873 t/ha/year depending on the sector. The assessment yielded an average of 36.4t/ha/year and a standard deviation of 105.3t/ha/year. Annual soil losses in the entire Diarha catchment area are estimated at 31882t/year; with a specific degradation of 42t/km²/year. The results will be compared to those of the Gambia watershed in Kedougou station which is contiguous to it.

Keywords: Diarha, GIS and RS, Rusle, Watershed

1. Introduction

Soil erosion is a complex phenomenon in which several factors can occur. In watersheds, the intensity of the kinetic energy of rain is the main erosive agent (Wischmeier and Smith, 1978). It gives the rain an ability to detach the land's particles. Thus, the detachment of the particles will be all the more considerable as the intensity of the rains is high. However, in bare or poorly permeable areas even low intensity rain can trigger runoff and cause splash erosion and sheet erosion. Rainfall efficiency is largely dependent on land use patterns, associated developments, and topographic status (Fotsing, 1993).

The Sudano-Guinean climate, the Precambrian basement formations, the differential of the upstream slopes downstream, the intensity and the seasonal, interannual and spatial irregularity of the rainfall (Thiaw, 2017),

give the Diarha watershed an important sensitivity to erosive processes (Thiaw *et al.* 2017). Since 1968, the Diarha catchment has experienced an unprecedented drought, which has resulted in a decline in soil and water resources. Added to this is the development and intensification of lowland agriculture resulting from the abandonment of upland agriculture, the destruction of vegetation and overgrazing. In addition, more and more agricultural projects, such as those of Development Company and Textile Fibers (SODEFITEX) and Support Program for Agricultural Development and Rural Entrepreneurship (PADAER), and uncontrolled mining spread over very fragile soils.

Soil loss can be estimated from in situ measurements or empirical formulas for universal adaptation. Sedimentological studies often require quite heavy financial means. However, the emergence of Geographic Information Systems and Remote Sensing offers new approaches for modeling water resources as well as processes for the transfer of sediments or pollutants. These are based on mathematical representations of fundamental hydro-climatic and erosive processes (Jah and Paudel, 2010). They are often applied to small geographical areas (agricultural plots, watersheds) such as the Soil and Water Assessment Tools model (Arnold *et al.*, 1995).

If it is possible to significantly reduce soil water erosion through adapted farming techniques such as crop rotation, milling, banding and mulching (Roose, 1967), it is first necessary to target strong erosion requiring priority intervention. RUSLE modeling (Revised Universal Soil Loss Equation), by Renard *et al.* (1997), makes it possible to estimate the soil particles, on a cell-by-cell basis (Shinde *et al.*, 2010), likely to be torn off and to map the zones most sensitive to water erosion. As a result, it is possible to locate areas of high erosion requiring priority intervention. The main problem in relation to the erosion risk models, like RUSLE and CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) is the validation, because of scarcely available data for comparing the estimates of the models with actual soil losses (Gitas *et al.*, 2009, Lazzari *et al.*, 2015). The advantage of the RUSLE model lies in the fact that it takes into account the majority of the factors playing a preponderant role in the processes of soil water erosion, namely the erosivity of rainfall (R factor), the length of the slope and its surface gradient (LS factor), soil erodibility (K factor), the effect of vegetation in presence (C factor), and anti-erosion cultural practices (P factor). According to this model, the damage of erosion comes primarily from the aggressiveness of tropical rains rather than a hypothetical fragility of tropical soils.

The purposes of the present study are made: (1) to develop a methodology that combines GIS and remote sensing data with RUSLE to assess spatial distribution of soil erosion at the Diarha catchment scale; (2) to analyze the impact of land use/land cover on soil erosion and (3) to delineate soil erosion probability zones.

2. Study Area

The Diarha catchment is a tributary of the left bank of the Gambia River. It extends between the parallels 12°26' and 12°63' and the meridians -12°86' and -12°57'. The physical environment of the basin has already been described in the earlier work of Thiaw *et al.* (2017). With an area of 759.3 km² and a perimeter of 145.1 km, the Diarha routes 45 km upstream downstream. Geologically, the basin is entirely in the Paleozoic and Proterozoic formations of the Birrimien basement, which gave rise, following a process of physico-chemical alteration of the rocks, to poorly permeable and very fragile soils.

From a climatic point of view, the Diarha catchment straddles two climatic domains: the South-Sudanian domain in the North and the Guinean domain in the South. It is influenced by the West African monsoon, with an irregular and variable rainy season (7 to 8 months) and a short dry season (4 to 5 months). Rainfall varies according to a North-South gradient, with 1136 mm in the North and 1344 mm in the South. The months of July, August and September represent 71% of the annual rainfall contributions.

With a Sudano-Guinean climate, average temperatures (T_m) of the Diarha catchment follow a bimodal evolution with a main peak in April (32.8°C) and a secondary maximum in October (27.7°C). The main minimum is observed in December (25.3°C) and the secondary minimum in August (26.5°C). The annual thermal amplitude is 13.5°.

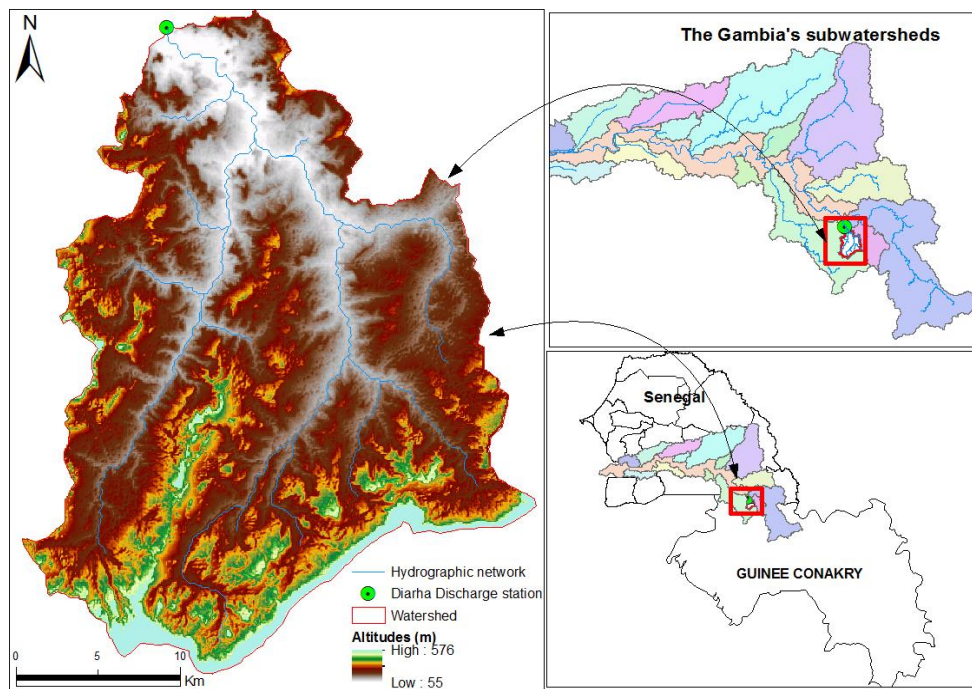


Figure 199. Location of the Diarha watershed in the Gambia River catchment area.

3. Materials and methods

3.1. Topographic Factor (LS)

The LS factor has two elements: surface gradient (S) and length (L) of slope. In the case of slopes slightly inclined erosion by splash effect and diffuse erosion are directly related to the kinetic energy of raindrops of rain (Roose, 1994). Beyond a slope greater than 2%, erosion experiences exponential growth (McCool *et al.* 1987), due to channel formation and growth, with the speed of runoff, diffuse erosion rates. The strong growth rate of erosion with the slope, then results mainly from the effect of the inclination on the speed of the runoff which can become sufficient to form ditches.

The slope length (L) and its slope gradient (S) were determined according to the procedure of Renard *et al.* (1997). For the factor (L), the landscape is divided into segments according to the inclination of each slope as shown below:

$$L = (\frac{\lambda}{72.6})^m \quad (40)$$

where (m) is the exponent of the slope length:

$$[m = \frac{\beta}{(1+\beta)}] \quad (41)$$

-λ is the slope length (in meters) and

$$\beta = (\sin \theta / 0.0896) / [3(\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \quad (42)$$

in which: θ is the angle of the slope; and β is the erosion rate of the gullies.

The gradient of slope (S) was calculated according to the equations of McCool *et al.* (1987) as follows:

$$S = (10.8 \times \sin \theta) + 0.03 \text{ for } S < 9\% \text{ and} \quad (43) \quad S = (16.8 \times \sin \theta) + 0.50 \text{ for } S \geq 9\% \quad (44)$$

Integrated in a GIS these equations become:

$$L = \frac{\text{Power}(\text{"Flow Acc"}+(\text{Cells}),\text{"m"}+1)-\text{Power}(\text{"Flow Acc"},\text{"m"}+1)}{\text{Power}(\text{Cells},\text{"m"}+2) * \text{Power}(22.13,\text{"m"})} \quad (45)$$

$$\beta = \frac{(\text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745) / 0.0896)}{(3 * \text{Power}(\text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745),0.8) + 0.56)} \quad (46)$$

$$m = \frac{\beta}{(1+\beta)} \quad (47)$$

$$S = \text{Con}(\text{Tan}(\text{"Slope"} * 0.01745) < 0.09, 10.8 * \text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745) + 0.03, 16.8 * \text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745) - 0.5) \quad (48)$$

The procedure for calculating these parameters via GIS is primarily to correct SRTM errors by filling in its depressions with ArcGIS Spatial Analyst Tools. Then, the direction and accumulation of flows in each resolution cell or pixel from the altimetric values of the Digital Terrain Model were determined, knowing that the water follows the path defined by the line of greatest slope. The accumulation of flows (flow-acc)

was then used to determine the slope length (L). The second step was to calculate the slope using the Slope tool of Spatial Analyst Tools, to determine the exponent (m) and the factor (S). The final step was to combine these two factors (L and S).

Several studies have shown that solid transports grow according to the slope, shape and length of the slope (Hudson, 1973, Mati *et al.*, 2000). These processes have an impact on the formation of gullies on the soil surface.

3.2. Anti-Erosion Cultural Practices

The support practice factor (P) in RUSLE is defined as the ratio of soil loss with a specific support practice to the corresponding loss with upslope and downslope tillage. P factor principally affect erosion by modifying the flow pattern or direction of surface runoff and by reducing the amount and rate of runoff (Renard and Foster, 1983).

In this study the P factor was estimated basing on slope system of the watershed (Table 87).

Table 87. Value of P factor (Ref Singh, 1994).

Land Slope%	P Value
1-2	0.6
3-5	0.5
6-8	0.5
9-12	0.6
13-16	0.7
17-20	0.8
21-25	0.9
> 25	1

The morphometric characteristics of the Diarha watershed and its sub-basins were determined using data from the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM 1 arc/second) for the National Aeronautics and Space Administration (NASA).

The processing of data from the SRTM satellite and the extraction of morphometric parameters were facilitated by the ArcGis 10.2 software, developed by the Institute for Research on Environmental Systems (ESRI).

3.3. Soil Erodibility Analysis

In this study, the soil map was extracted from the Harmonized World Soils Database (FAO, 2009). Brown's texture triangle (Brown, 2003) and Stone and Hillborn's correspondence table (Stone and Hillborn, 2000) have made it possible to derive the soil erodibility (K-factor) from the texture. However, soil texture values are expressed in the US system, that is, tons/acre. They were therefore converted into the international system, and for this a factor of 0.1317 is multiplied by each value of K (Table 88).

Soil erodibility (K) is a function of Organic Matter (OM) and soil texture, permeability and profile structure. It usually depends on the nature of the soil, the inclination of the slope and the density of the vegetation cover. It ranges from 0.70 for the most fragile soils to 0.01 for the most stable soils (El Garouani *et al.*, 2008).

Table 88. Diarha K factor and Organic Matter (OM) values for different textures (Ref- HWSD).

Sand%	Silt%	Clay%	Organic Carbon%	Organic Matter%	K
75	13	12	0.7	1.204	0.05
49	28	23	0.58	0.997	0.34
69	18	13	0.46	0.791	0.14
57	19	24	0.33	0.567	0.2
57	19	24	0.33	0.567	0.2
54	27	19	1.12	1.926	0.14
54	27	19	1.12	1.926	0.14
39	28	33	0.81	1.393	0.33

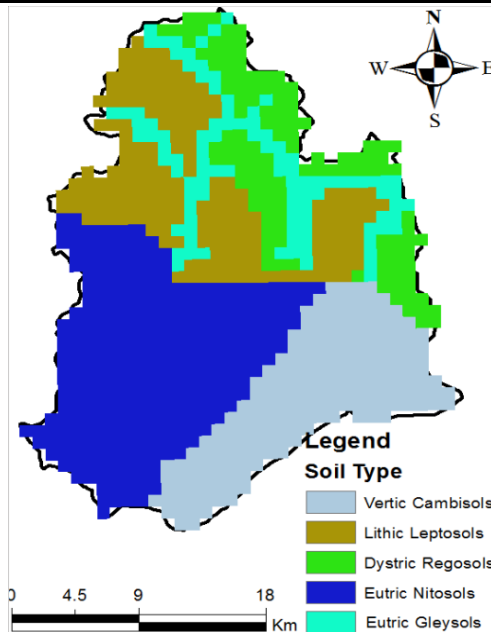


Figure 200. Mapping of the main soil types of the Diarha watershed.

3.4. Rainfall Erosivity Analysis

Soil erosion is highly dependent on the kinetic energy of water drops due to splash and runoff effects. Wischmeier and Smith (1978), by correlating erosion, instantaneous intensity and kinetic energy of water drops, considers that soil erosion is directly proportional to the maximum rainfall intensity of 30 minutes (I_{30mn}) and total kinetic energy (E). This relationship helps to evaluate the effect of rain on the soil. However, these types of meteorological data are very difficult to obtain and are not available in the study area.

In the absence of available data necessary for the estimation of the R-factor, other authors have developed formulas allowing, from the monthly (Arnoldus, 1980; Oliveira and Medina, 1990), and annual (Roose, 1977; Renard and Freimund, 1994) rainfall, the calculation of this factor. Several studies carried out in West Africa on soil water erosion highlight a linear relationship between kinetic energy and rainfall. According to Roose, (1977), the relationship between the average annual aggressiveness index (R), and the mean annual rainfall (P) is expressed in West Africa according to this equation:

$$R = P \times 0.5 + 0.05 \quad (49)$$

The application of this equation requires homogeneous rainfall data over a period of at least ten years, and a good spatial distribution of rainfall stations. However, the heterogeneity of the measurement stations of the Diarha catchment does not allow a good calculation of the R-factor; in which case a single value would be generalized to the whole basin. Thus, the climate data needed for this study were extracted from the WorldClim 2 database (Fick, and Hijmans, 2017). This database contains monthly average weather data from around the world for temperatures and precipitations from 1970 to 2000. The spatial resolution ranges from 30 seconds to 10 minutes.

To extract the climate data from the basin, we made a Clip of the WorldClim database with the basin villages file using the Arc Map's Spatial Analyst tool; then spatialized the annual averages of each station by the interpolation technique of the Inverse Distance Weight (IDW) (Figure 201).

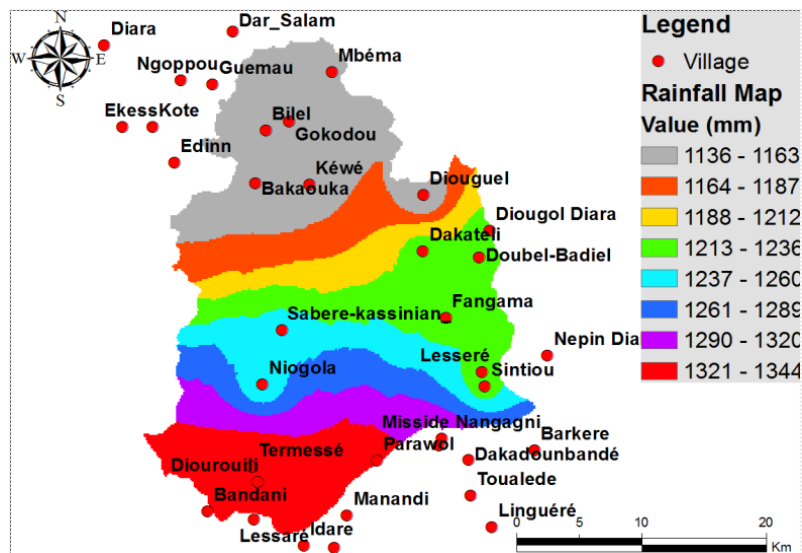


Figure 201. Spatial variation of rainfall in the Diarha Basin

3.5. Cover Management Analysis

The study of land use/land cover was based on the interpretation of Landsat OLI/TIRS satellite images (Table 89). To counter atmospheric effects on vegetation, surface reflectance was calculated using Envi software.

The classification of land use has been validated using Google Earth's very high spatial resolution images. Thus, seven (7) classes of land use have been identified: (1) Village, (2) Agricultural Area, (3) Open Forest, (4) Dense Forest, (5) Gallery Forest, (6) Bare Soil and (7) Water.

Table 89. Description of satellite images data.

Data type	Source	Description
DEM	Earth Explorer	CARTO DEM (SRTM 1 arc/s)
Landsat OLI/TIRS	Earth Explorer	High resolution image (30 m); Path 202, Row 051; Date November 08, 2017
Soil data	HWSD/Version 1.1	Harmonized Soil Map of the World based on the soil textures
Climate data	Worldclim.org/Version 2	Average worldwide monthly rainfall data (1970-2000), Resolution 30 seconds

The Rusle equation uses five sub-factors to calculate the C factor: soil management; soil cover by plant canopy; soil cover by crop residues; roughness of soil surface; and soil moisture (Renard *et al.* 1997). However, the assessment of each sub-factor is difficult because of the many possible combinations, and the time spent with data acquisition and analysis (Schonbrodt *et al.* 2010). In this study, the C factor was determined from the rescaling NDVI, according to the method proposed by Durigon *et al.* (2014):

$$Cr = [(-NDVI + 1/2)] \quad (50)$$

This method is a prerequisite for Rusle C-factor and is recommended for use in tropical regions (Carvalho *et al.* 2014).

Cover management factor (C) varies from near zero for a well-protected land cover to 1 for barren areas.

Hence, the impact of this factor on soil erosion is not much important when the land use/land cover of the watershed area comprises highest percentage of forest and plantation crops (Ganasri and Ramesh, 2016).

3.6. Soil Loss Modeling

The Rusle model of Renard *et al.* (1997) is an improvement of the Universal Soil Loss Equation (USLE) of Wischmeier and Smith (1978). It is combined with techniques and methods of Geographic Information Systems and Remote Sensing to estimate and map the average rate of soil loss. However, only the sheet erosion processes are taken into account by this model.

Rusle is an empirical and quantitative model that combines factors with a strong influence on soil water erosion, namely the kinetic energy of intense rainfall (R-factor), the physico-chemical properties of soils (K-factor), terrain characteristics (LS-factor), vegetation cover (C-factor) and anti-erosion practices (P-factor). It is obtained from this formula:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (51)$$

where A is the soil loss per unit area, R is the Rain-erosivity factor, C is the Cropping and Management factor, K is the soil erodibility factor, LS is the slope length and steepness factor and P is the conservation practice factor.

In this study, calculation of Soil Erosion using Rusle is based on Sub-watersheds level. The Diarha watershed has nine sub watersheds as shown the figure 202.

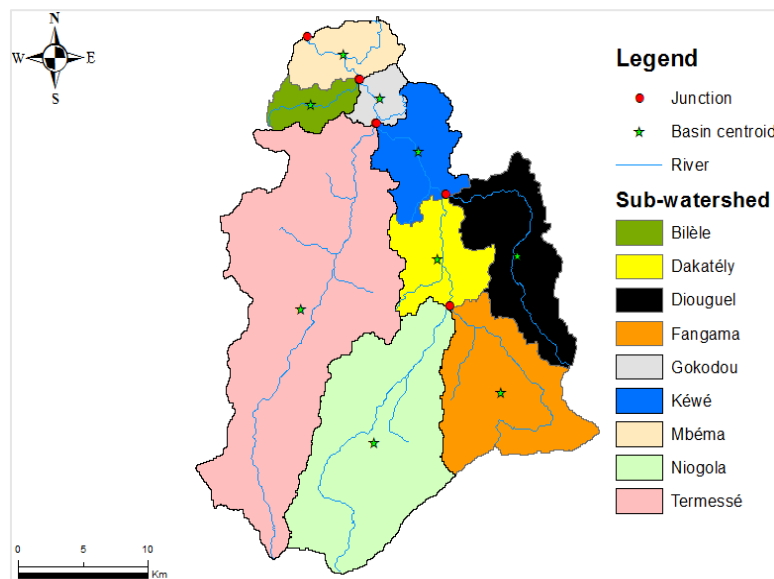


Figure 202. Sub-watersheds Map.

The synthesis of the general methodological approach presented in figure 203 explains the use of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS environment. All Rusle model's factors were

processed and obtained using ArcGIS 10.2 and ENVI 5 software. The product of these factors resulted in annual soil loss throughout the Diarha catchment. Then, these factors were combined to delineate soil erosion probability zones using the overlay method (weighted overlay index) integrated in Arc Map's Spatial Analyst tool.

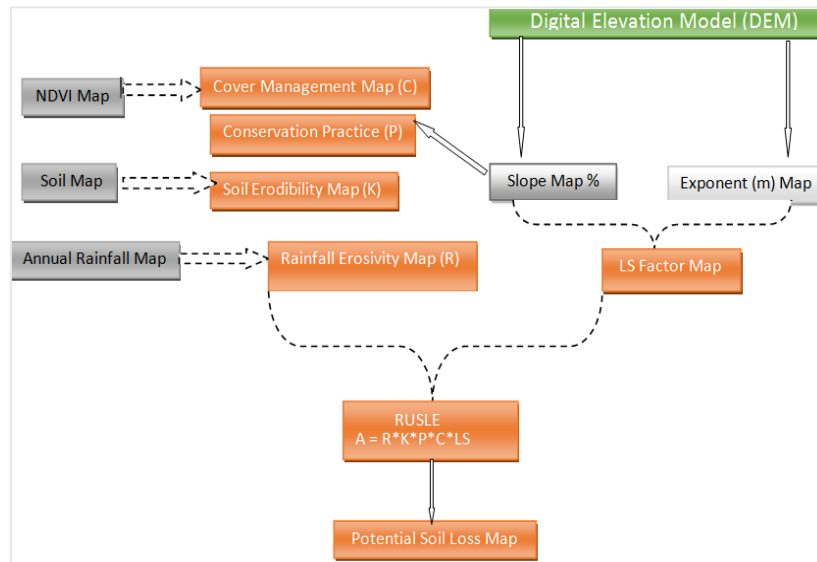


Figure 203. Synthesis of the methodological approach used.

4. Results and discussions

4.1. Topographic Factor (LS)

The slopes of the basin follow the topographic gradient of the watershed. Slope classes 0-2; 3-4 and 5-8 scattered throughout the basin, occupy more than 86% of the basin area. Slope class 23-43, very localized, notably along the Northern part of the Fouta Djallon foothills and to the North-west (Bassari Mountains), occupies only 3.8% of the basin (Figure 204).

The following figures (Figures 204-213) show the results of the various parameters involved in the calculation of the topographic factor LS. They highlight a contrast between the different models of the Diarha watershed. At the Center and downstream, the weak slopes of the Diarha watershed are not very sensitive to erosion processes, whereas upstream and to the Northwest, the steep reliefs reveal a greater sensitivity to erosive processes.

The topographic factor LS shows that 93.8% of the basin surface is in class 0 to 2.16, and 6.2% in that of 2.17 to 30.5, which reveals the heterogeneous nature of the topography of the Diarha catchment. The lowest values (0.03 to 0.37) are attributed to the streambed and the highest (7.76 to 30.47) to the northern foothills of the Fouta Djallon, the Bassaris Mountains and the steepest slopes.

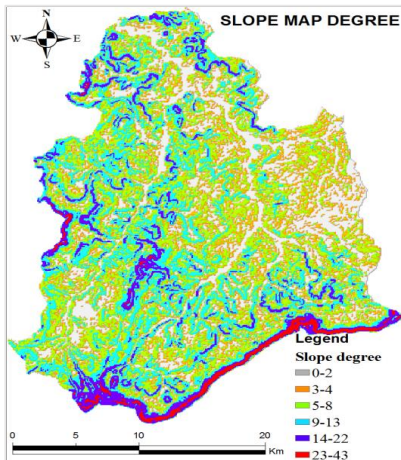


Figure 204. Diarha watershed Slope System

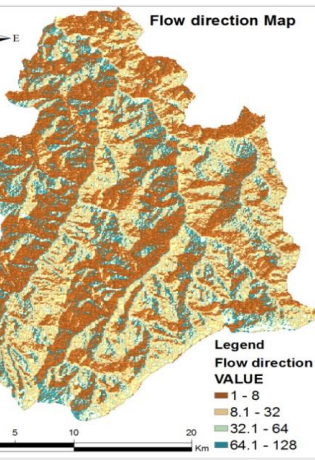
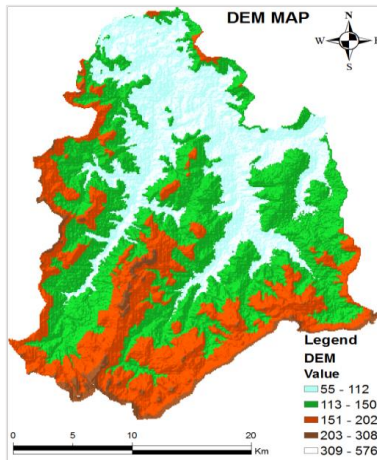


Figure 206. Flow Direction Map.

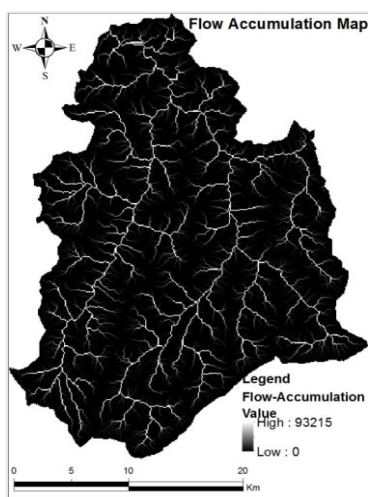


Figure 207. Flow Accumulation Map.

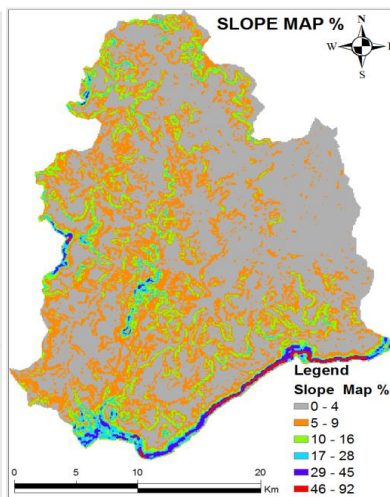


Figure 208. Slope Map (Percentage).

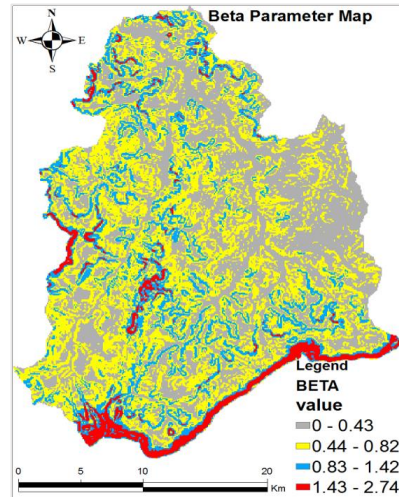


Figure 209. Beta Parameter Map.

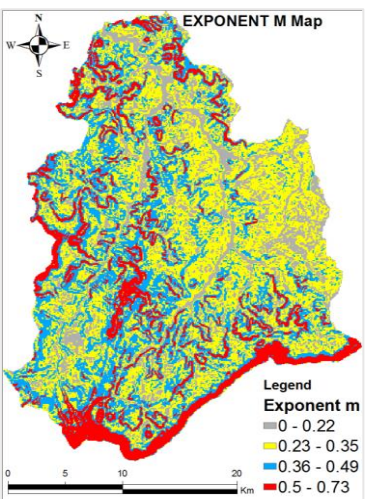


Figure 210. Exponent m Map.

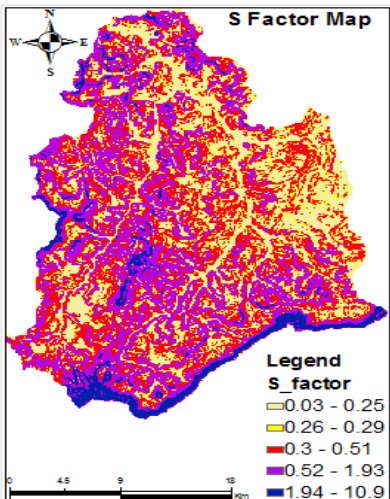


Figure 211. S Factor Map.

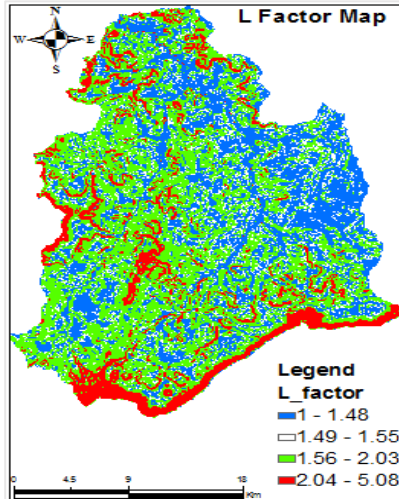


Figure 212. L Factor Map.

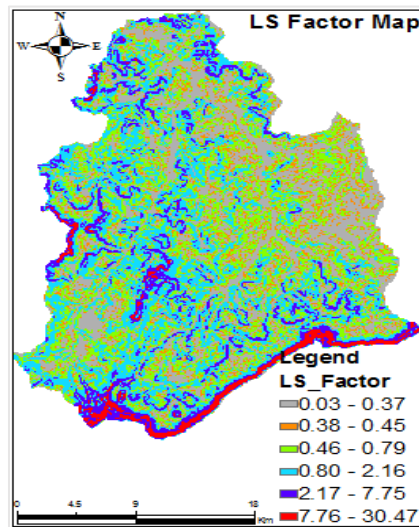


Figure 213. LS Factor Map.

4.2. Climatic Erosivity (*R-factor*)

The spatial distribution of the rainfall erosivity factor (*R*) shows that the Diarha watershed is subject to increasing rainfall erosion on a North-South gradient, with a slight increase from East to West.

The analysis of the *R-factor* map shows that the rainfall erosivity varies between 568 and 672 MJ.mm/ha.h.yr, with an average of 620 MJ.mm/ha.h.yr. These results allow deducing that the Diarha basin is subjected to a high erosive power.

The lowest erosivity classes (568 to 582 MJ.mm/ha.h.yr) are localities in the sectors of Mbéma, Bilèle, Kéwé, Diouguel and Bakaouka, North of the Diarha basin. They occupy 27% of the basin area. In this part of the basin, the average annual rainfall varies between 1000 and 1163mm.

In the Guinean part of the basin, with an intense rainfall (greater than 1200 mm), the risk of erosivity of the rains is very severe (600 to 672 MJ.mm/ha.h.yr).

Table 90. *Classes of annual Rainfall erosivity (*R-factor*).*

Classes	Erosivity R	Area	Percent%
568-582	Slight	204	27
583-593	Low	58	8
594-606	Moderate	55	7
607-618	High	130	17
619-630	Very High	84	11
631-644	Severe	62	8
645-672	Very Severe	168	22
Total		759	100

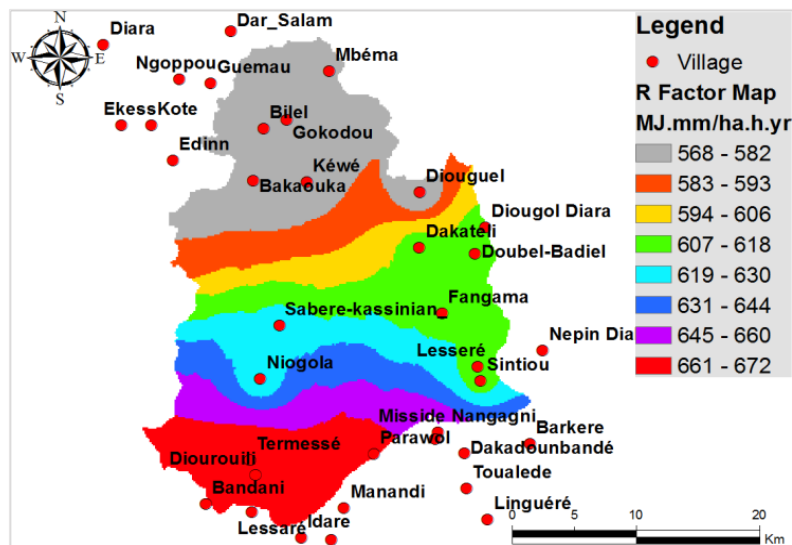


Figure 214. Map of climatic erosivity (R factor).

4.3. Soil Erodibility (K-factor)

The results obtained for soil erodibility (K factor) at the scale of the Diarra catchment ranged from 0.05 to 0.14 t.ha.h/ha/MJ.mm for the most resistant soils (Cambisols); from 0.15 to 0.20 t.ha.h/ha /MJ.mm for soils the resistant means (Leptosols and Regosols) and from 0.21 to 0.34 t.ha.h/ha/MJ.mm for the most erodible soils (Nithosols and Gleysols).

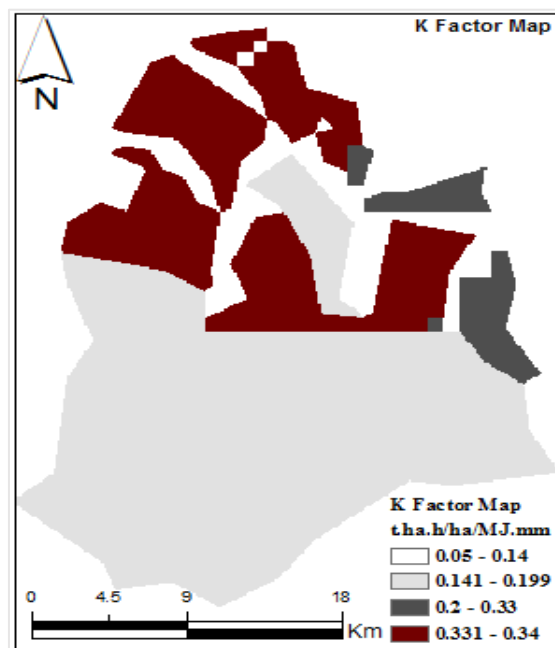


Figure 215. K-factor Map.

4.4. *Anti-Erosion Cultural Practices (P-factor)*

In this study, the values of the weaker anti-erosive practices (P-factor) correspond to those of the weak to moderate slopes.

The P-factor varies between 0.66 and 1 for the steeper areas, generally located in the South and North-west of the Diarha catchment area.

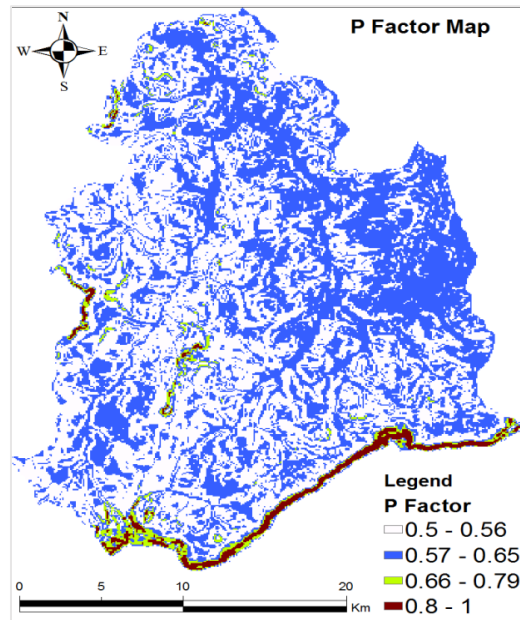


Figure 216. P Factor Map.

4.5. *Cover Management C-factor*

Vegetation plays a decisive role in the hydrology of a watercourse. Its installation and maintenance are related to lithology and climate. However, its hydrological efficiency depends on a fundamental notion in surface hydrology: that of the vegetal cover. The latter acts on the water cycle by its aerial biomass, which intercepts a part of the precipitation whose intensity depends on the density of the plant cover; and by its root system which, according to its importance, also maintains and furnishes the banks of watercourses and plays a decisive role of protection against erosion of runoff and support of low-water flows.

In this study, the influence of vegetation cover on soil water erosion was analyzed from C-factor (Figure 217), which is derived from the NDVI (Figure 218). The vegetation cover is considered as the second factor (after the topography) to control the risk of water erosion of soils. Soil loss decreases when the density of vegetation cover increases (Roose, 1977 ; Morgan, 2005 ; Phuong *et al.* 2012).

Analysis of the C-factor map reveals that the highest values are for water, bare soil and farmland, with the

lowest values being for plant cover.

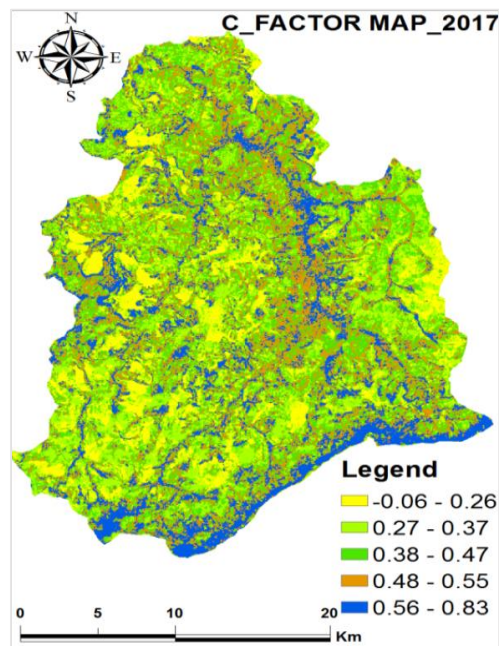


Figure 217. Cover Management C Factor Map.

Analysis of the land use map (Figure 219) and table 91 shows that vegetation cover alone accounts for more than 50% of the Diarha catchment area. Three types of vegetation cover have been identified. It is in order of importance: (1) the Forest Gallery which borders the banks of the downstream basin occupies 19% of the area of the basin; (2) Dense forest, mainly located in the South and East, occupies 17% of the basin and (3) the Open Forest represents 16% of the catchment area. The forest cover index, which is the ratio of total forest area to catchment area, is 0.52.

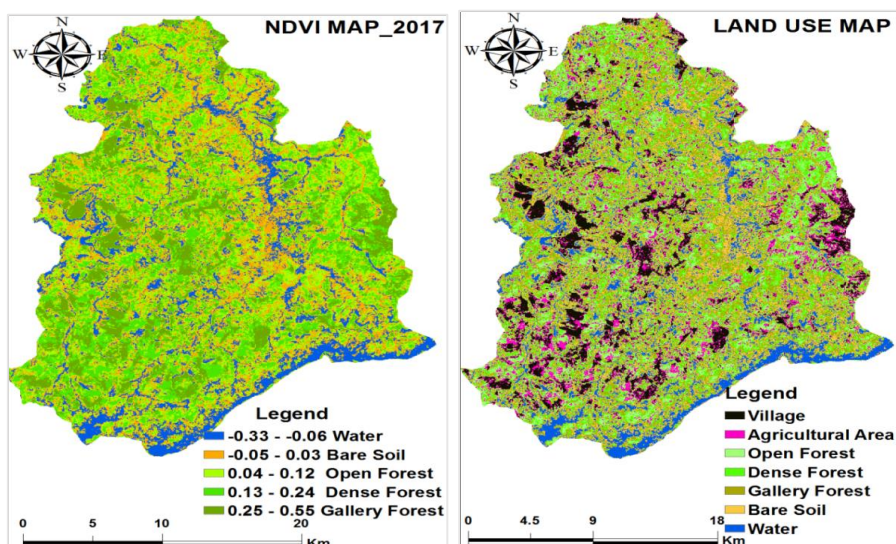


Figure 218. NDVI Map.

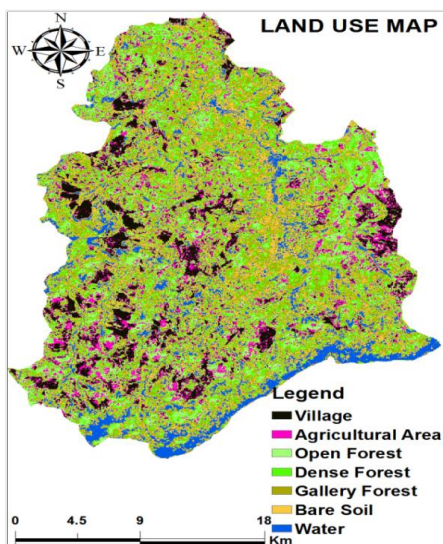


Figure 219. Land use Map.

Table 91. Statistics of Land use classes.

Land Use	Area (km ²)	Area Percent%
Village	67.9	9
Agricultural Area	85.6	11
Open Forest	125.0	16
Dense Forest	131.9	17
Gallery Forest	140.6	19
Bare Soil	133.6	18
Water	74.7	10
Total	759.3	100

4.6. Potential Annual Soil Losses

The erosive risk map shows a strong spatial heterogeneity of erosion rates. They vary between 0 and 1873 t/ha/yr depending on the sector (Figure 220). The assessment yielded an average of 36.4 t/ha/yr and a standard deviation of 105.3 t/ha/yr. However, despite their heterogeneity, these values show a spatial structure defined by topo-landscape location. The hillsides of the basin suffer the highest rates of erosion; mean values are observed at the upstream portions of the slopes and at the lowest values at the summit ridges, in the alluvial valleys and in the downstream concavities. Otherwise, alluvial valleys, unlike steep slopes and ridges, are sedimentation zones and not erosion zones (Renard *et al.* 1997). The erosive risk map should therefore provide negative erosion values in these areas. This is due to the fact that the Rusle modeling does not take into account the transport/sedimentation processes by the drainage network. According to Morschel and Fox (2004) areas of sedimentary deposits are often characterized by low risk of sediment detachment in the erosive risk map.

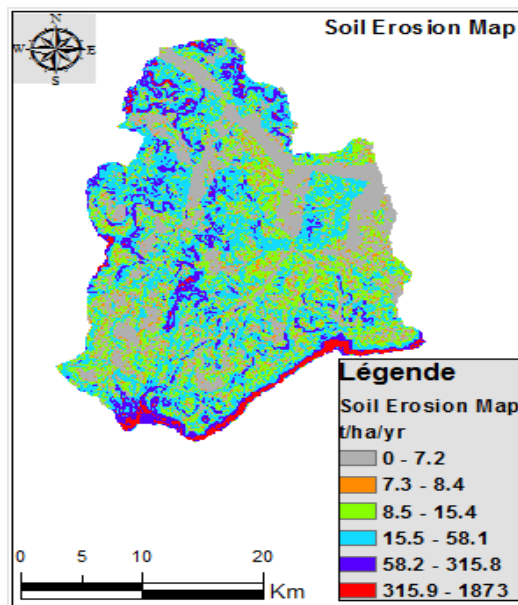


Figure 220. Potential Soil Loss Map.

The analysis in table 92 reveals that 24% of the catchment area has a very low risk of erosion (0 to 7 t/ha/yr).

This part of the basin, occupied by the alluvial valleys, is protected by the forest gallery which runs along the banks of the Diarha watershed from upstream to downstream. It occupies about 19% of the basin area and more than 35% of the vegetation cover. Classes from 7 to 15 t/ha/yr present a low to moderate erosive risk. They occupy about 31% of the basin area. Erosion problems are very marginal in these areas due to the presence of much localized control mounds. While, the steeper areas are strongly subject to erosion: erosion rates vary between 58 and 1873 t/ha/yr.

Table 92. *Classes and Statistics of Potential Soil losses.*

Classes (t/ha/year)	Area (Km ²)	Percent%	Erosivity Risk
0 – 7	180	24	Slight
7 – 8	57	8	Low
8 – 15	174	23	Moderate
15 – 58	258	34	High
58 – 316	74	10	Very High
316 – 1873	16	2	Severe
Total	759	100	

The sub-basins of the Guinean part of the Diarha basin (Termessé, Fangama, Diouguel and Niogola) are more sensitive to soil erosion: erosion rates vary between 3000 and 13298 t/year. As for those of the Senegalese part (Bilèle, Mbéma, Dakately, Kéwé and Gokodou) the average annual erosion rates vary between 200 and 955 t/year (Table 93). Annual soil losses in the entire Diarha catchment area are estimated at 31882 t/year; with a specific degradation of 42 t/km²/year.

The results obtained show that the factors causing water erosion in the Diarha catchment area (rainfall intensity, soil characteristics; the slope length and its slope gradient) are the most influential factors in the increase in erosive potential.

Table 93. *Potential Soil Loss per Sub-watershed.*

Sub-watershed	Soil Loss t/year	Specific Erosion t/km ² /year
Niogola	7873	49.4
Termessé	13298	48.4
Fangama	4561	49.0
Diouguel	3680	48.9
Kéwé	502	46.5
Gokodou	316	50.2
Dakately	207	47.0
Mbéma	490	47.1
Bilèle	955	48.5

5. Conclusion

The objectives of this study were to map the main factors involved in soil erosion processes, as well as the vulnerability of the Diarha watershed to erosive risk. Adaptation of the Rusle model has identified areas most affected by land degradation, and the model can easily be applied to the entire Gambia watershed where measured solid flow data are available from 1979 to 1984 for the Gouloubou station, and for the

years 1974 and 1986 at the Kedougou station. According to Lerique, (1975) the average of the mechanical erosion obtained in the Gambia watershed at the Gouloumbou station is about 250.000 t/year. At the Kedougou station it varies between 125/130.000 t/year (Bamba, 1987). The erosive risk mapping method is, despite its limitations, a new management tool allowing managers to better target their priority intervention strategies.

CHAPITRE VIII. ETUDE DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES BAS-FONDS

Introduction

Ce chapitre porte sur la mise en valeur des ressources en eau des bas-fonds du Diarha. Y sont abordés, après l'analyse de la perception de l'espace par les populations, les formes d'usages, les contraintes de gestion des ressources en eau, les politiques et/ou réglementations de gestion et d'accès aux ressources (gouvernance locale) ainsi que les stratégies d'adaptation mises en place par les paysans.

Les bas-fonds du bassin versant du Diarha sont le siège de toutes les activités traditionnelles (agriculture, pastoralisme, maraîchage et agroforesterie). Toutefois, leur mise en valeur effective est sujette à des contraintes (naturelles, humaines, économiques, etc.) et déséquilibres qui limitent sévèrement les performances auxquelles l'on peut s'attendre. C'est ainsi qu'il faut comprendre le caractère descriptif de ce chapitre, basé sur l'observation et complété par les enquêtes de terrain réalisées auprès des exploitants agricoles qui a permis de cerner les principaux obstacles qui s'opposent à la rentabilité agricole.

VIII.1. Perception de l'espace par les populations

On s'intéresse particulièrement dans cette étude à l'analyse de la perception de l'espace par les populations du bassin du Diarha. Pour cela, le mémoire de Thioubou A. (1995) intitulé « *fonctionnement, perception et dynamique des écosystèmes de bas-fonds en Pays Bassari* » et les enquêtes quantitatives menées auprès des exploitants agricoles nous ont servi de référence.

VIII.1.1. L'espace ethnique

Le bassin versant du Diarha est marqué par la conformité entre niveau topographique et répartition ethnique : traditionnellement les bas-fonds sont l'habitat préféré des Peulhs, tandis que les Bassaris, Diakhanké, Bedik, et Badiaranké sont les maîtres des versants. Ces derniers, traditionnellement de religion animiste, se sont réfugiés sur les parties hautes de la toposéquence pour résister aux razzias esclavagistes et échapper au harcèlement séculaire des Peulh musulmans. C'est grâce à cet isolement qu'ils ont su garder leurs coutumes « intacts ». Cependant, depuis la sécheresse des années 1970, ils migrent vers l'espace des bas-fonds où les conditions agronomiques, hydrologiques et sylvopastorales sont plus favorables aux activités agricoles.

Les exploitants des bas-fonds sont constitués essentiellement de Peulhs qui occupent à eux seuls 55% de la population enquêtée. Ce groupe ethnique est suivi par les Diakhanké, les Bedik, les Bassaris et les Badiaranké qui occupent 35% des exploitants agricoles (Tab.94).

Tableau 94. Répartition ethnique dans le bassin versant du Diarha

Ethnie	Nombre d'exploitants	Fréquence (%)
Peulh	106	54.9
Malinké	8	4.1
Diakhanké	42	21.8
Bassaris	9	4.7
Bedik	10	5.2
Badiaranké	6	3.1
Sarakolé	2	1.0
Total	193	100

Source enquête de terrain, décembre 2019

Les Peulhs sont surtout présents à Salémata, Dar Salam, Mbéma et dans la partie guinéenne du bassin ; les Badiaranké à Bakaouka, Kéwé, Edinn et Bilèle ; tandis que Bassaris, Bedik et Diakhanké peuplent majoritairement les villages de l'axe Diouguel-Outiounbel (Fig.221).

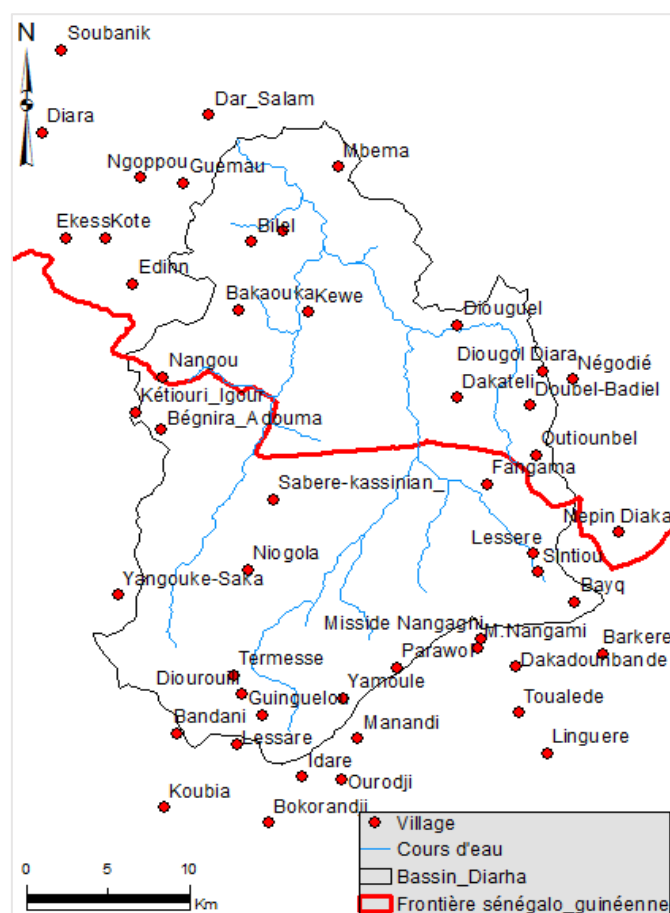


Figure 221. Carte de la disposition des villages dans le bassin.

VIII.1.2. L'espace écologique

VIII.1.2.1. La toponymie

La toponymie est l'élément qui rend le plus compte des relations entre la société et son espace. En distinguant et en nommant les diverses composantes, elle s'identifie au territoire et identifie en même temps les ressources et les contraintes auxquelles elles s'associent. Chez les Peulhs, la terminologie géographique fait ressortir tout un ensemble de termes distincts appartenant soit à la topographie, soit à l'hydrologie ou aux formations végétales.

VIII.1.2.1.1. Les unités topographiques

On distingue quatre unités topographiques principales : le « *Félo* », le « *Bowal* », le « *Dunkiré* » et le « *Kotiuri* ».

Dans la terminologie Pulaar, « *Félo* » renvoie à la colline. Il est divisé en deux parties :

- le « *Yélémburu* » qui correspond au sommet du versant
- le « *Seere* » qui renvoie au talus de raccordement

Traditionnellement domaine d'habitat des Bassaris, le « *Félo* » est inculte et est essentiellement utilisé pour le parage du bétail.

Intégré dans la terminologie géomorphologique, le « *Bowal* » est attribué à une vaste étendue de cuirasses latéritiques ou ferrallitiques recouverte par une savane arborée ou boisée. Il est totalement inculte. Quant au « *Dunkiré* », il est assimilé à un endroit caractérisé par des herbes hautes qui se développent sur un sol noir communément appelé « *Léidi-baléré* », caractérisé par sa richesse en matières organiques mais aussi par sa capacité de rétention d'eau très élevée. Il est réservé à la culture du maïs et correspond à la zone centrale du bas-fond. Il se raccorde à deux autres couronnes : le « *Corase* » ou « *Faro* » et le « *Kotiuri* ».

- Le « *Corase* » renvoie à la vallée principale où l'eau des pluies stagne pendant une bonne partie de l'année favorisant ainsi la culture du riz. Les sols qu'il porte sont appelés « *Loope* » (boue) du fait de leur forte teneur en montmorillonite.
- Le « *Kotiuri* » est assimilé à des sols constitués de gravillons ferrugineux et de sables de couleur rouge. Il renvoie à la terre qui porte le sorgho.

VIII.1.2.1.2. Les unités hydroclimatiques

Les Peulhs du bassin du Diarha distinguent les unités hydrologiques suivantes :

- le « *Diidéré* » ou lit mineur : c'est une partie du lit où l'eau coule encore pendant la saison sèche alors que le reste du cours d'eau est complètement à sec ;
- le « *Weendu* » et le « *Bundu* » qui désignent les mares ou plans d'eau qui se remplissent pendant la saison des pluies ;
- le « *Caangol* » ou le « *Maayo* » qui désignent la rivière ou le fleuve.

Ils identifient également quatre saisons climatiques :

- le « *Ndungu* » qui correspond à la saison des pluies ;
- le « *Dabbundé* » à la saison froide et celle des récoltes ;
- le « *Ceedu* » ou saison chaude ;
- et le « *Hore-setto* » qui marque la fin de la saison sèche et le début de la saison des pluies.

VIII.1.2.1.3. Les formations végétales

Selon la taille de la formation végétale, les Peulhs distinguent :

- le « *Laddé* » qui correspond à la forêt galerie
- et le « *Buruuré* » ou « *Bulle* » qui désigne la savane boisée ou la forêt sèche.

La description de ces principales unités et leurs caractéristiques permet de percevoir quelques aspects liés à la perception de l'espace. Le plus important, c'est que le découpage fait par les Peulhs est conforme en plusieurs points à celui que nous avons adopté. La différence de fond réside dans la classification des diverses unités, tandis que dans le premier cas, la notion de bas-fond se confond au « *Dunkiré* », dans le second, elle s'élargie et englobe le « *faro* » et le « *Kotiuri* ».

VIII.2. Localisation spatiale des activités humaines

Dans les bas-fonds du bassin versant du Diarha, l'agriculture et l'élevage constituent les activités dominantes. Ils occupent 96% des secteurs d'activités. L'analyse de la figure 222 montre la place prépondérante de l'agriculture dans l'économie rurale du bassin du Diarha, avec 80% des secteurs d'activités.

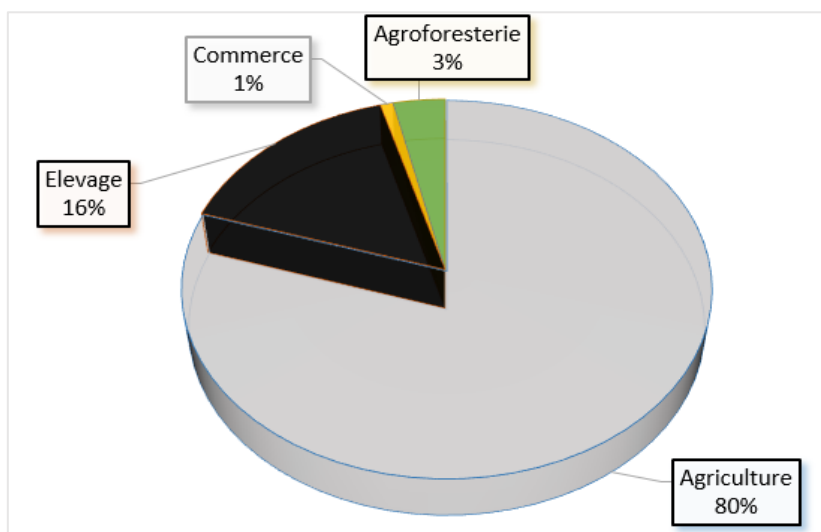


Figure 222. Les secteurs d'activités dans le bassin du Diarha (Source enquête de terrain)

C'est une agriculture extensive de subsistance basée sur l'itinérance et l'utilisation d'instruments aratoires archaïques pour la plupart. Les enquêtes de terrain ont montré que la charrue, la daba et la houe constituent les instruments les plus utilisés dans les travaux champêtres ; moins de 1% des exploitants utilisent des instruments modernes (tracteurs, motopompe...).

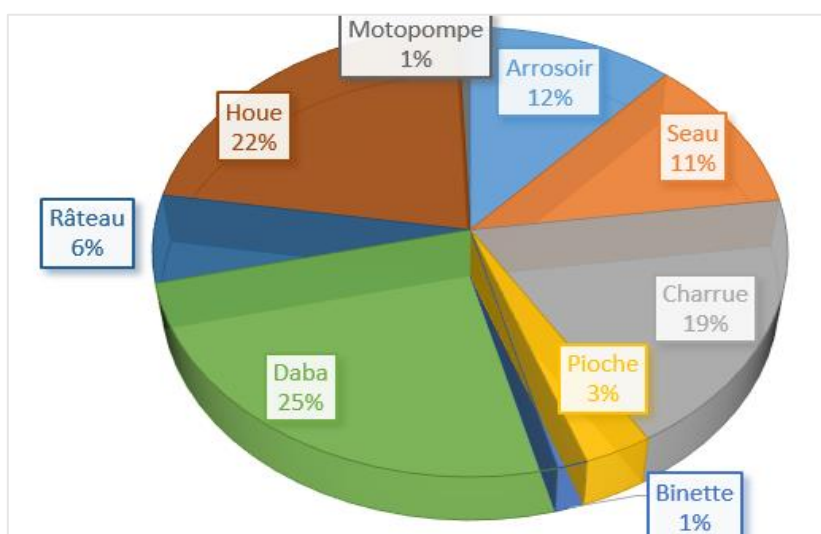


Figure 223. Les outils de travail dans les bas-fonds du Diarha.

VIII.2.1. Les Types de Cultures

La mise en valeur des ressources en eau des bas-fonds est caractérisée par les cultures pluviales et de saison sèche. Cependant, les cultures pluviales dominent très largement avec 72% contre 28% pour les cultures de saison sèche (maraîchage et agroforesterie) (Fig.224).

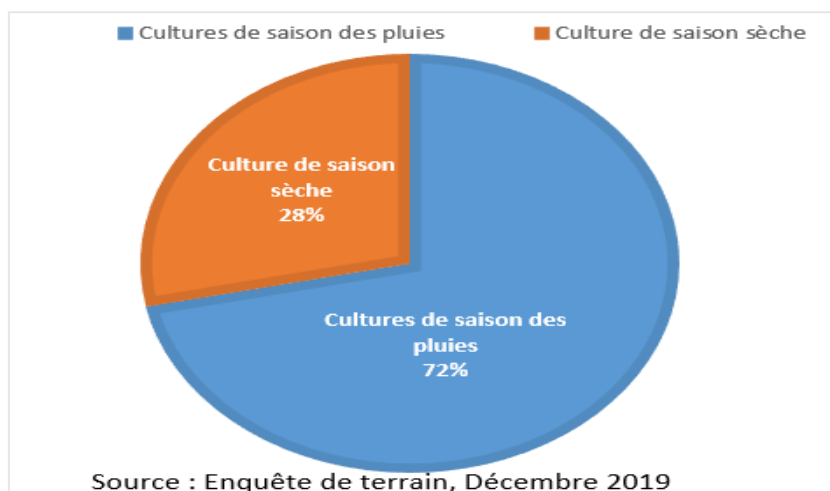


Figure 224. Les types de cultures dans les bas-fonds du Diarha

Dans les bas-fonds, le riz, le maïs et l'arachide constituent les spéculations dominantes en saison des pluies. Plus de 60% des exploitants intervenant dans les bas-fonds pratiquent la riziculture et la culture du maïs et 27% s'adonnent à la culture arachidière. Par contre, les cultures de fonio, mil et de coton occupent une part très faible dans les activités culturales soit respectivement 4%, 3% et 2% (Fig.225). Les spéculations cultivées en saison des pluies, en dehors du coton, sont des cultures vivrières qui sont d'abord destinées à l'autoconsommation et le surplus à la commercialisation.

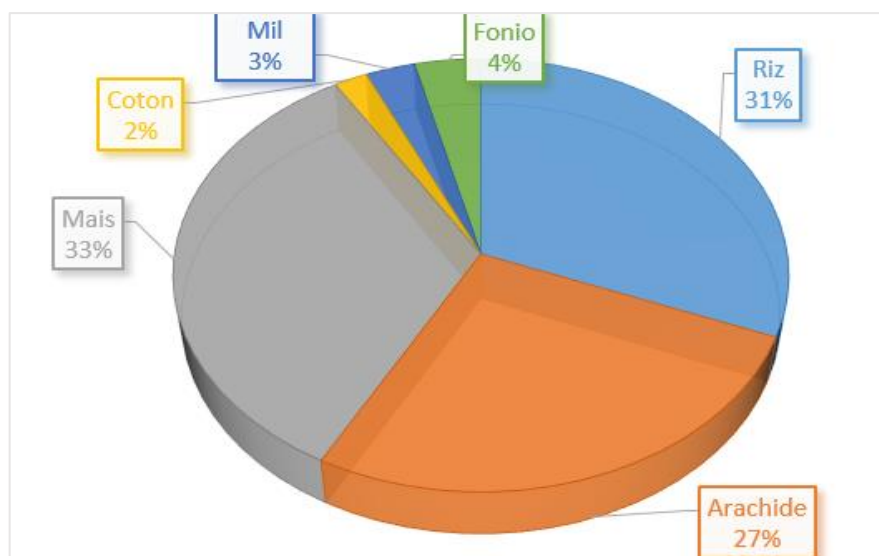


Figure 225. Les types de spéculations en saison des pluies

Les spéculations de saison sèche concernent l'activité maraîchère consacrée à la culture des légumes. Dans cette activité agricole, l'oignon, la tomate, le gombo et la pomme de terre (ou voandzou) constituent les spéculations dominantes (Fig.226). Ces produits agricoles sont destinés généralement à la commercialisation.

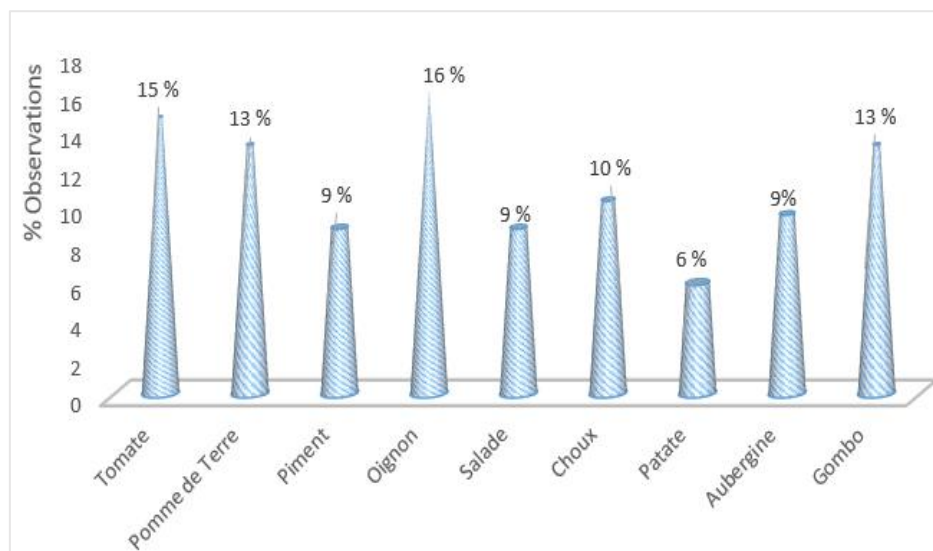


Figure 226. Les types de spéculations en saison sèche

VIII.2.2. Superficies des parcelles exploitées

Initialement pratiquées sur les versants, les activités agricoles se sont progressivement déplacées vers les bas-fonds du bassin versant du Diarha. Ces endroits, inondés pendant une bonne partie de l'année, sont favorables au développement de la double culture (pluviale et de contre saison).

L'analyse des statistiques agricoles du département de Salemata par l'intermédiaire du tableau 95 montre que les superficies emblavées évoluent en dents de scies, mais avec une différence nette en comparant la période pendant (1988-1993) et après la sécheresse (2010-2019) hydroclimatique des années 1970. En effet, de 2403 ha entre 1988 et 1993, elles sont passées à 4033 ha sur la période 2010-2019, soit une hausse moyenne de 1630 ha. Cette hausse pourrait résulter de la conjonction de trois facteurs :

- le retour des conditions pluviométriques à leur niveau moyen après 1993 : de 992 mm durant la période 1968-1993, les lames d'eau précipitées sont passées à 1075 mm après 1993 (1994-2016) ;

- L'intérêt accru accordé à la culture du coton : de 282.4 ha entre 1988 et 1993, les superficies cultivées sont passées à 449 ha sur la période 2010-2019, soit une hausse moyenne de 166.6 ha. Le coton intéresse les jeunes préoccupés à la fois par la dot et par le souci de satisfaire des besoins matériels plus importants qu'exige une société en pleine mutation.
- La baisse de fertilité des sols qui exige plus de surfaces cultivées pour maintenir un niveau minimum de production.

Tableau 95. Evolution des superficies emblavées (en ha) pour diverses spéculations entre 1988-1993 et 2010-2019 (Source CR. Salemata)

Spéculation	Mais	Riz	Sorgho	Arachide	Coton	Fonio	Total
1988-1989	483	64	538	205	27	21	1338
1989-1990	935	297	454	208	142	35	2071
1990-1991	466	144	230	206	215	163	1424
1991-1992	1100	232	871	759	328	290	3580
1992-1993	105	442	1099	1051	700	205	3602
2010-2011	1237	58	156	509	911	137	3008
2011-2012	1788	108	256	419	300	135	3007
2012-2013	1104	517	260	321	210	201	2613
2013-2014	701	360	596	1500	120	170	3447
2014-2015	1200	650	1177	389	742	246	4404
2018-2019	3135	2012	899	1018	410	246	7720
Moyenne	1144	444	594	599	373	168	3292

Les enquêtes de terrain menées auprès des agriculteurs des bas-fonds révèlent que la taille moyenne des exploitations est de 3.5ha/exploitant, répartie en moyenne sur quatre parcelles de culture. Pour connaître la superficie cultivée par localité, il suffit de multiplier la superficie moyenne cultivée (3.5ha) par le nombre de ménages (Tab.96).

Tableau 96. Caractéristiques démographiques des principales localités du bassin du Diarha (Source CR. Salemata)

Localité	Nbre de concessions	Nbre de ménages	Population	Surface cultivée (ha)	Nbre de parcelles exploité
Bakaouka	37	39	285	136.5	156
Bilèle	4	6	32	21	24
Dar Salam	30	35	510	122.5	140
Diarha-Pont	17	17	253	59.5	68
Epingué Bassari	20	20	153	70	80
Epingué Peulh	14	14	56	49	56
Ethiolo	65	65	503	227.5	260
Koté	15	15	93	52.5	60
Diarha Gandjiri	5	5	15	17.5	20

Diarha Nangar	11	11	76	38.5	44
Nangar Bassari	9	9	85	31.5	36
Nangar Peulh	64	64	369	224	256
Ngoppou	14	14	99	49	56
Salemata	115	115	779	402.5	460
Dakately	32	32	482	112	128
Diouguel	13	15	208	52.5	60
Neppen Peulh	10	10	75	35	40
Neppen Diakha	14	14	111	49	56

VIII.2.3. Les calendriers cultureux

Dans les bas-fonds du bassin versant du Diarha, les activités agricoles se déroulent suivant les deux saisons. En effet, les activités maraîchères sont entamées dès novembre et se prolongent jusqu'au mois d'avril. Les premières récoltes interviennent en février et les dernières au mois de mai. Entre fin mai et début octobre, les agriculteurs axent leurs activités sur les cultures pluviales (l'arachide, le maïs, le riz, etc.) dont les récoltes se font en octobre/novembre.

Tableau 97. Calendrier cultural des bas-fonds du bassin du Diarha

Cultures	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril
Pluviales												
Maraîchères												
Récoltes												
Défrichages												

Toutefois, en fonction des types de cultures, chaque spéculation présente un calendrier qui lui est spécifique.

VIII.2.3.1. Le calendrier cultural du riz

Le sous-secteur du riz se caractérise par des cultures à court cycle, avec notamment l'usage de deux variétés hâtives : Sahel 108 et Niérica 1. Le Niérica 1 est une espèce hybride résultant du croisement entre deux espèces *Oryza sativa* et *Oryza glaberrima* ; alors que Sahel 108 est une variété simple issue de l'espèce *Oryza sativa*. Il connaît un cycle un peu plus long que le Niérica, 105 jours après semis. D'une manière générale, les espèces hybrides sont beaucoup plus résistantes à la sécheresse, aux insectes et maladies, que les espèces simples telles que Sahel 108, Dg8-341 et ITA 150.

Ces variétés de riz sont d'abord semées en pépinière à partir du mois de juin, suivi du repiquage entre mi-juillet et début août. La récolte et le battage se font en octobre-novembre (Tab.98). C'est une activité qui est, jusque-là, l'apanage des femmes.

Tableau 98. Le calendrier agricole du riz

Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
Défrichage							
		Semis en pépinière					
			Repiquage				
				Désherbage			
						Récolte et Battage	

La culture du riz est surtout pratiquée dans la partie centrale des bas-fonds, zone par excellence de concentration et de convergence des eaux de ruissellement. L'analyse des apports en eau de surface du bassin du Diarha, par l'intermédiaire de la figure 227 montre que la riziculture pluviale bénéficie des conditions optimales d'humidité – l'essentiel des apports est concentré durant sa période d'exploitation (juillet-septembre) – mais reste fortement entravée par les adventices ou « *lay-lay* » (en langue locale). Par ailleurs, l'engorgement continu des bas-fonds sous l'effet des fortes crues peut aussi être un obstacle déterminant pour les cultures. Selon les agriculteurs, les plus faibles rendements du riz pluvial sont notés lorsque la pluviométrie est excédentaire car elle occasionne la dégradation des plantes à travers l'engorgement continu et l'ensablement des rizières.

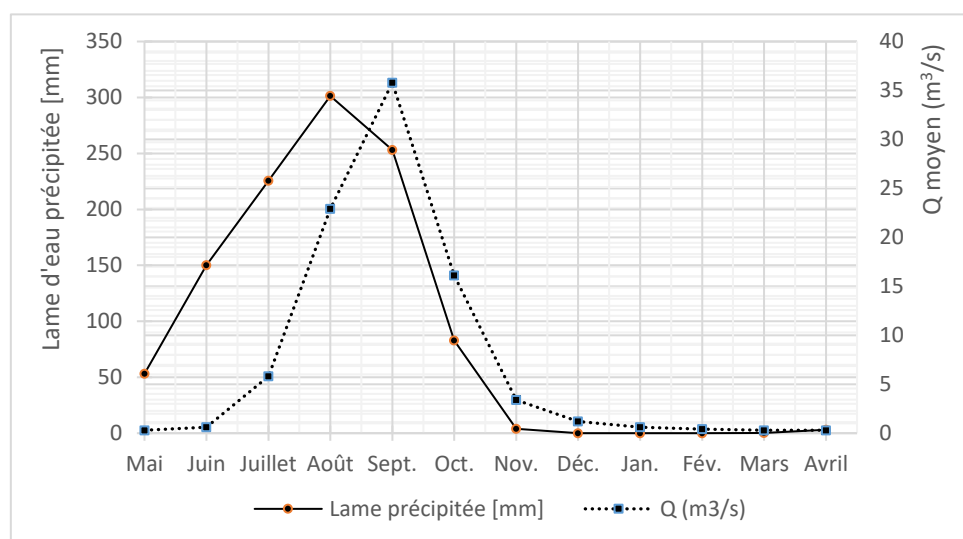


Figure 227. Lames d'eau précipitée (1921-2016) et débits (1961-2012) moyens mensuels du bassin du Diarha

VIII.2.3.2. Calendrier culturel du maïs

La culture du maïs connaît une plus grande extension au niveau des têtes de bas-fonds car moins exigeante en eau. Son activité, du semis à la récolte dure généralement 3 mois et demi. L'analyse du tableau 99 montre que la culture du maïs est amorcée dès le mois de juin et s'étend jusqu'en fin août. Durant cette période le bassin du Diarha enregistre en moyenne 677 mm de pluie (Cf. Fig.227). Cette grande quantité d'eau favorise le développement des adventices et une importante activité de désherbage.

Tableau 99. Le calendrier agricole du maïs

Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Défrichement						
		Semis				
			Désherbage			
						Récolte

VIII.2.3.3. Calendrier culturel de l'arachide

Plus exigeante en eau que le maïs, la culture de l'arachide se fait au cœur de la saison des pluies (juillet-septembre). L'analyse du calendrier culturel montre que l'arachide achève son cycle en 90 jours. Il s'agit d'une variété hâtive qui est généralement cultivée au niveau des têtes de bas-fonds dominées par des sols hydromorphes à pseudo-gley sur matériau gravillonnaire. Ces sols à texture fine argilo-limoneuse ou argilo-sableuse se prêtent mieux au développement de cette spéculaculture car assez filtrants et ameublissent pour permettre la pénétration des gynophores puis l'arrachage des gousses mûres.

Tableau 100. Le calendrier agricole de l'arachide

Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Défrichage						
			Semis			
				Désherbage		
						Récolte

VIII.2.3.4. Le calendrier culturel du coton

De toutes les spéculations cultivées dans les bas-fonds du Diarha, c'est le coton qui connaît le plus grand cycle et par ailleurs, le plus grand consommateur d'eau. Sa culture s'étend sur toute la saison pluvieuse (Tab.101).

Pratiquée sur les versants comme production de rente, la culture cotonnière est surtout l'apanage des jeunes soucieux de satisfaire leurs besoins matériels ou financiers.

Tableau 101. Calendrier agricole du coton

Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Défrichage								
		Semis						
			Désherbage					
							Récolte	

VIII.2.4. La question foncière

Elle est très sensible dans le bassin versant du Diarha – en raison des multiples contraintes (disponibilité de l'eau, menace écologique sur les versants, instruments aratoires traditionnels) qui font que les superficies à valoriser sont amoindries – mais aussi la rupture née de l'introduction de nouveaux acteurs et de modes de gestion par les institutions. Cependant, la menace la plus sensible est, à notre sens, celle que constitue la course foncière matérialisée par la descente des versants, habitat ancestral des Bassaris, au profit des bas-fonds.

Les personnages centraux régissant les aspects du droit foncier dans les bas-fonds du bassin versant du Diarha sont les chefs de famille et les « *Jarga* » (chefs de village). Les élus locaux interviennent rarement dans le domaine foncier selon la population ciblée. Environ 91% des exploitants affirment qu'il n'existe pas de problèmes liés à l'accès à la terre. Les quelques problèmes rencontrés sont dus à une mauvaise délimitation des parcellaires. Cependant, les litiges entre les agriculteurs et les éleveurs sont très fréquents dans les bas-fonds.

VIII.2.4.1. Les acteurs internes

L'essentiel des acteurs intervenant dans la mise en valeur des bas-fonds du Diarha sont des agriculteurs qui sont composés d'hommes et de femmes. Les hommes interviennent généralement dans les bas-fonds en saison des pluies et les femmes s'adonnent plus à la riziculture et aux cultures de saison sèche (agroforesterie et maraîchage). D'après les résultats de nos enquêtes, l'âge médian des exploitants agricoles est de 42 ans ; 65% de ces exploitants interviennent à titre familial et 28% à titre individuel. Les 7% restants constituent des Groupements de Promotion Féminine (GPF) qui interviennent dans le maraîchage et dans la transformation de produits forestiers et agricoles (Fig. 228).

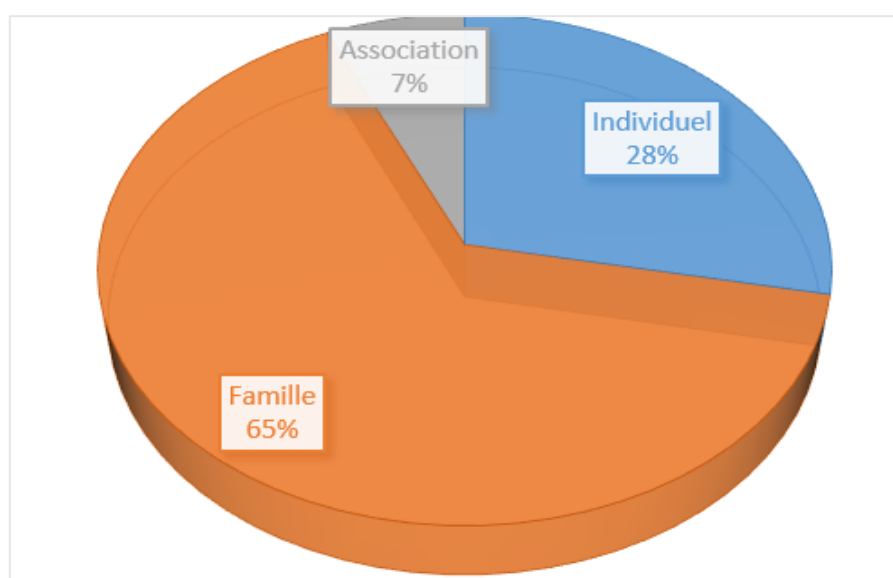


Figure 228. Organisation du travail par les exploitants des bas-fonds

Dans les bas-fonds du Diarha, 75% des exploitants sont propriétaires des parcelles qu'ils exploitent, 10 % y accède par prêt, 4% par location et 11% par don (Fig.229). Chez les Bassaris, la terre appartient au chef de famille qui la partage en trois parties : il se réserve la plus grande partie pour l'arachide et le maïs, l'autre partie sert de « *faro* » aux femmes pour la culture du riz et le maraîchage, tandis que le reste est réservé aux jeunes pour la culture du coton. Contrairement à la femme peulh, la femme Bassaris peut être propriétaire à condition d'avoir l'accord de son mari. De plus les terres se transmettent de façon matrilineaire.

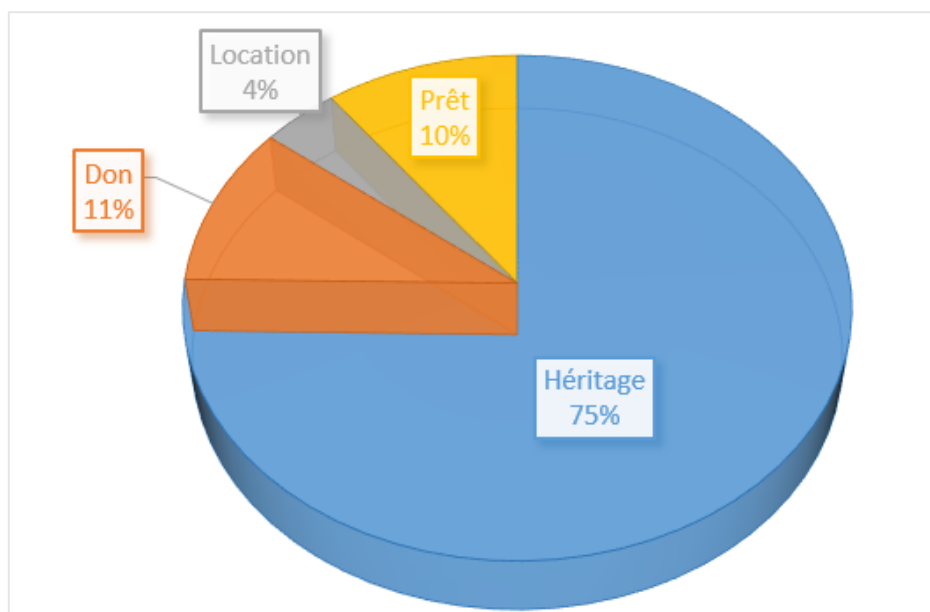


Figure 229. Statut d'occupation des parcelles des bas-fonds

VIII.2.4.2. Les acteurs externes (le Système d'appui)

Les acteurs externes sont composés d'Organismes Non Gouvernemental (ONG) (Wula-nafaa et la Lumière), d'opérateurs économiques (PAMECAS, CORI-BANK...) et de services étatiques (PADAER, P2RS et BAMTAARE-SODEFITEX) qui appuient et encadrent la mise en valeur des bas-fonds à travers l'octroi de crédits, matériels et d'intrants agricoles, ou encore à travers la conception d'aménagements hydroagricoles.

Les enquêtes menées auprès des exploitants agricoles ont montré que le bassin versant du Diarha, à l'image de toute l'économie rurale du sud-est du Sénégal, souffre d'un système d'appui de proximité performant. Seulement 1% des exploitants bénéficie de l'appui des municipalités en termes d'intrants et de matériels agricoles et 8.6% des supports du PADAER, P2RS et de BAMTAARE-SODEFITEX. Quant aux ONG (Wula-nafaa et la-Lumière) elles interviennent dans la formation et l'encadrement de Groupements de Promotion Féminine (GPF) pour la transformation de produits agricoles et/ou forestiers ; environ 5% des GPF interrogés reconnaissent avoir bénéficié de leurs supports (Fig.230).

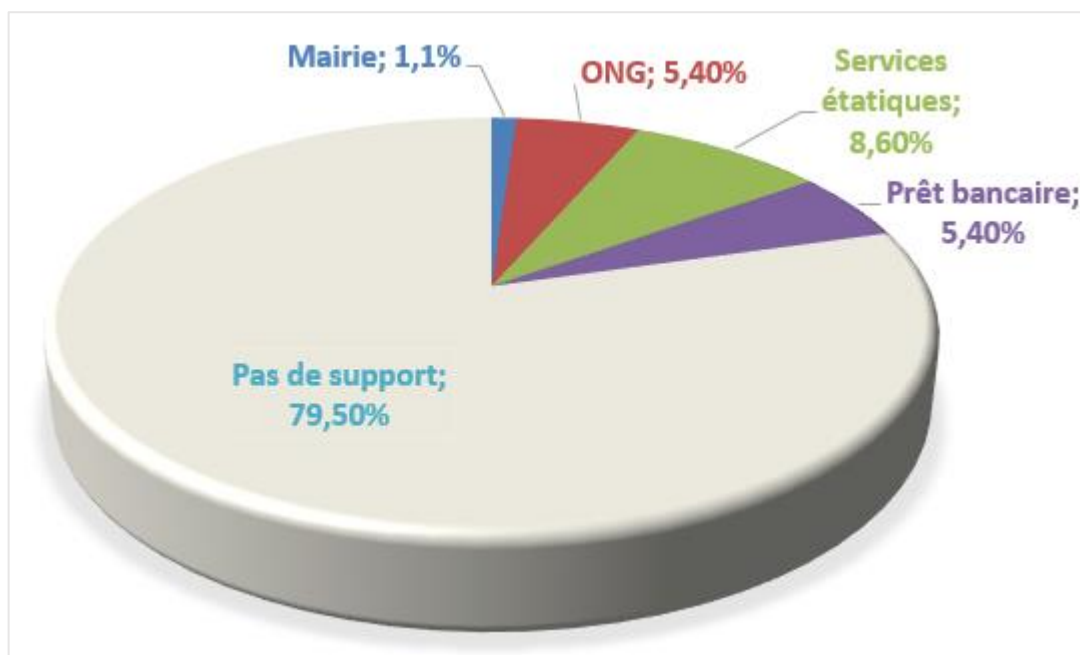


Figure 230. Poids du système d'appui dans l'économie rurale du bassin du Diarha

VIII.2.5. Rendement et Production

Les principales spéculations cultivées dans les bas-fonds du Diarha sont : le maïs, le riz, l'arachide, l'oignon, la tomate, le gombo et le voandzou. Les enquêtes de terrain ont permis de recueillir les perceptions des rendements agricoles. Ainsi, plus de 90% des exploitants estiment que les rendements sont faibles à modérés (Fig.231). Les rendements agricoles tournent autour de 3.2 tonnes à l'hectare pour les céréales, 1.5 tonnes à l'hectare pour le coton et 500kg par hectare pour le voandzou.

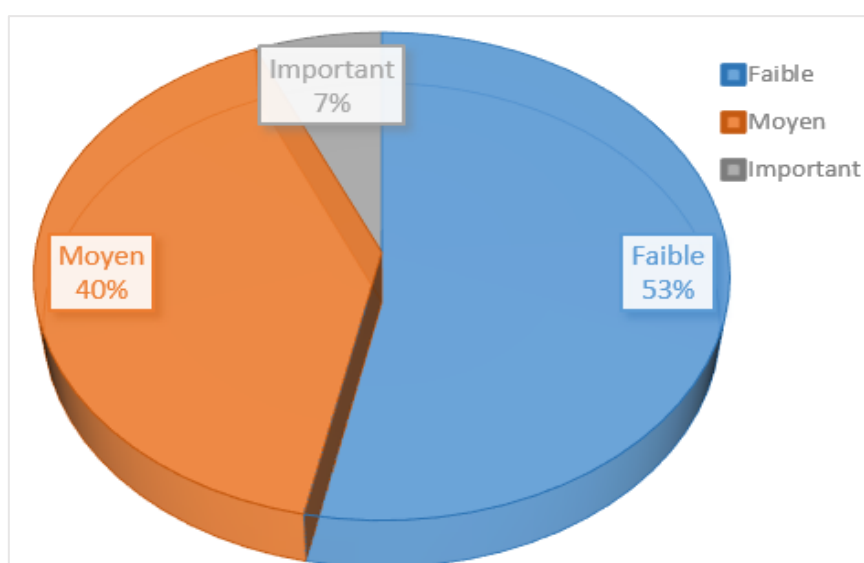


Figure 231. Perception des rendements par les exploitants agricoles

La production est très fluctuante. Son examen par l'intermédiaire de la figure 232 montre que c'est surtout les productions de maïs, d'arachides et de riz qui connaissent les plus grandes variances. Ainsi, la production de maïs est passée de 1162 T avant 1993 (1988-1993) à 4088 T entre 2009 et 2019 ; celle de l'arachide de 1979 T à 2389 T et la production du riz de 396 T à 1789 T, respectivement pour les mêmes périodes.

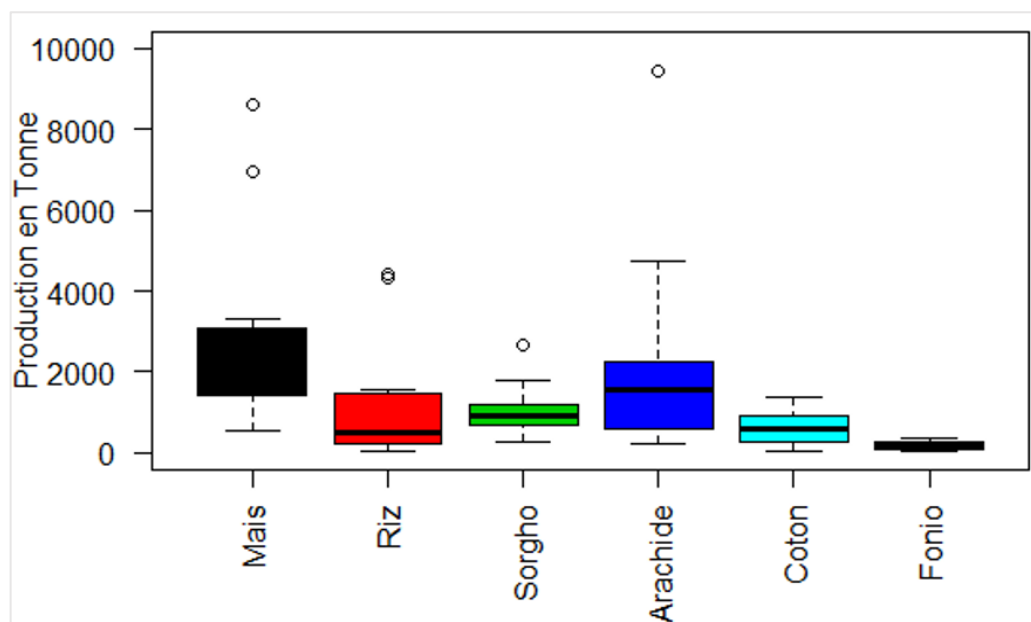


Figure 232. Box-plot des spéculations de cultures pluviales

Rapportée à la population de 2019 des principales communes rurales du bassin versant du Diarha, la production de maïs, céréale de base chez les Peulhs donne une moyenne de 633 kg par personne et par an ; celle de l'arachide 370 kg/personne/an et 277 kg/personne/an pour la production du riz (Tab.102). Les productions de maïs sont plus importantes à Dakately (914 kg/personne/an), Dar Salam (865 kg/personne/an) et Salemata (707 kg/personne/an). Celles du riz varient de 400kg/personne/an (Dakately) à 101kg/personne/an (Termessé) et les productions d'arachides de 534kg/personne/an (Dakately) à 135kg/personne/an (Termessé).

Tableau 102. Production par habitant pour diverses spéculations

Nom de Localité	Population 2019 <i>Sources : ANSD-Février 2016 & INS-Guinée, Décembre 2017</i>			Production (Kilogramme/Personne/an)					
	Masculin	Féminin	Total	Mais	Riz	Arachide	Coton	Sorgho	Fonio
CR. Termessé	8370	9390	17760	230	101	135	44	75	12
CR. Youkounkoun	4400	4690	9090	450	197	263	86	147	24
CR. Salemata	2938	2847	5784	707	309	413	135	231	38
CR. Dakately	2180	2295	4475	914	400	534	174	299	48
CR. Dar Salam	2358	2369	4727	865	378	505	165	283	46
Moyenne				633	277	370	120	207	34

L'étude de corrélation entre superficies emblavées et productions agricoles a montré que la relation entre ces deux variables n'est expliquée que par 53% de la variance totale. Autrement dit, plus de terres cultivées n'est pas toujours synonyme de plus de tonnes récoltées (Fig. 233-234). L'intérêt de cette comparaison est de confirmer le caractère extensif et aléatoire de l'agriculture dans les bas-fonds du bassin versant du Diarha. Extensif car il n'y a pas de correction des paramètres physiques par l'intensification qui, pratiquée dans de bonnes conditions, aurait pu atténuer les effets néfastes des facteurs physiques ; Aléatoire car dépendant de la pluviosité et des potentialités agronomiques des sols.

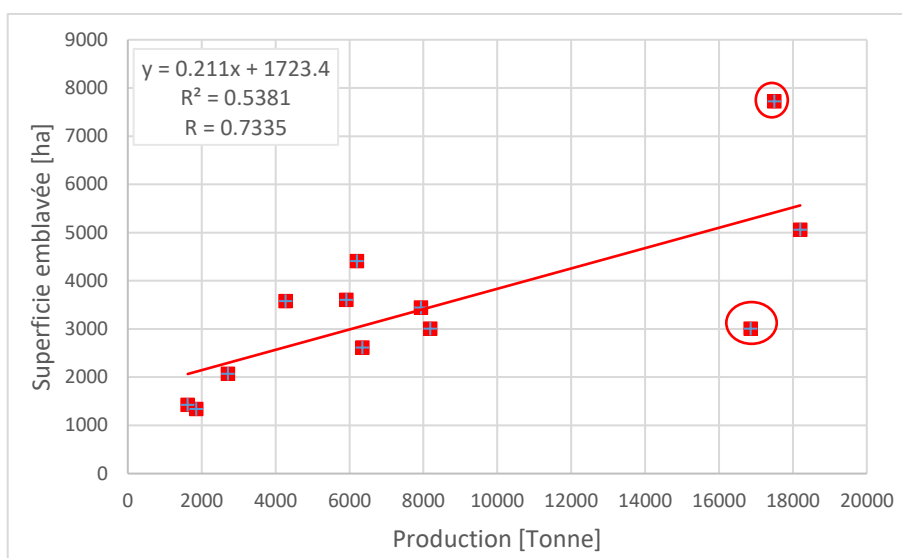


Figure 232. Corrélation superficies emblavées et productions agricoles

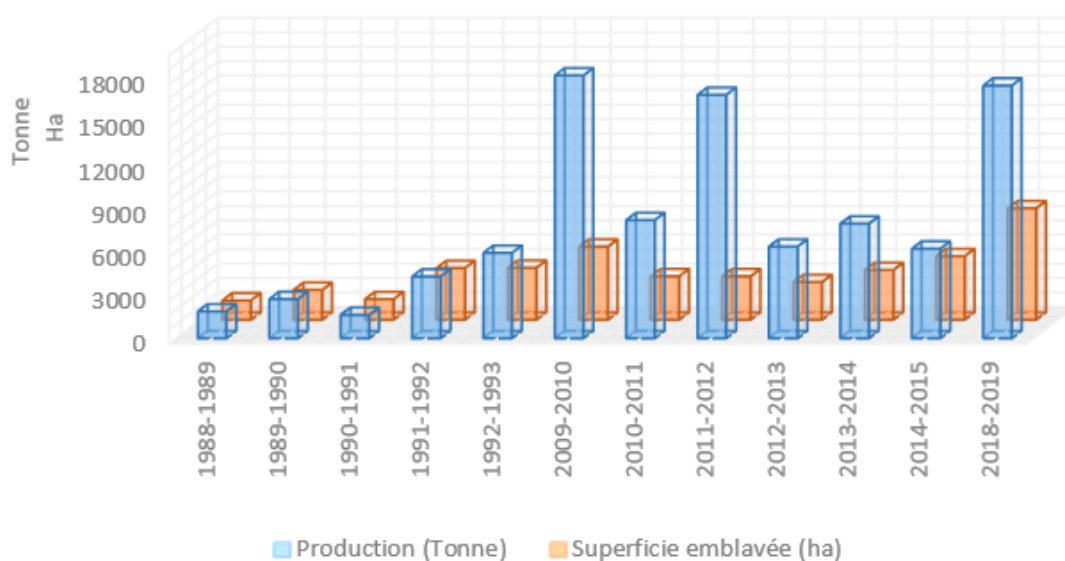


Figure 233. Evolution comparée des superficies emblavées et des productions agricoles
(source CR. Salemata)

Tableau 103. Tendances de la production agricole (en tonnes) entre 1988-1993 et 2009-2019
(Source CR. Salemata)

Spéculation	Maïs	Riz	Sorgho	Arachide	Coton	Fonio	Production totale (tonnes)
1988-1989	791	61	642	313	31	21	1859
1989-1990	1464	356	469	208	182	35	2714
1990-1991	559	144	253	237	267	163	1623
1991-1992	1430	534	871	835	313	290	4273
1992-1993	1566	884	1009	851	1400	205	5915
2009-2010	2812	4332	1070	9432	478	75	18199
2010-2011	3335	1356	1278	1636	478	103	8186
2011-2012	6949	1554	2658	4751	685	259	16856
2012-2013	2072	273	712	2234	869	191	6350
2013-2014	2859	486	1037	2290	1000	264	7935
2014-2015	1968	95	785	1897	1070	386	6201
2018-2019	8621	4426	1816	1527	863	243	17496
Moyenne	2869	1208	1050	2184	636	186	8134

Toutefois, il convient de signaler que les statistiques sur les rendements des cultures de contre saison telles que l'oignon, le gombo, l'aubergine, la tomate et le chou ne sont disponibles ni au niveau des services compétents ni moins auprès des producteurs. Néanmoins, si on se réfère aux produits commercialisés par les GPF des bas-fonds de Dar Salam (« *Yakaar* ») et de Dakately (« *Yaye-Ndiaaré* ») lors de la campagne 2017-2018 on pourrait estimer la production légumière moyenne des bas-fonds du Diarha à 29 kg/semaines.

VIII.3. Impact de la Pluviométrie sur la Production Agricole

La variabilité notée sur la pluviométrie et les écoulements du bassin du Diarha a produit une variabilité similaire sur les productions agricoles. En effet, la production moyenne de maïs est passée de 1162 T avant 1993 (1988-1993) à 4088 T après 1993 (2009 et 2019) ; celle de l'arachide de 179 T à 2389 T et la production du riz de 396 T à 1789 T, respectivement pour les mêmes périodes. Ces fluctuations interannuelles des productions agricoles sont liées, en partie, à la récession hydroclimatique notée sur la période 1968-1993, et au retour de la pluviométrie à son niveau moyen à partir de 1994. L'analyse des courbes de variation entre pluie moyenne et production de chaque spéculat (Fig.234) montre aussi que durant plusieurs années, les productions agricoles sont dans l'étroite dépendance des pluies, de leur abondance ou de leur déficit : c'est l'exemple des années 1988-1989, 1990-1991, 1992-1993 et 2012-2013 où baisse des pluies rime avec baisse des productions agricoles. Certaines années à pluviométrie excédentaire riment également avec une abondance des productions agricoles : c'est l'exemple des années 1989-1990, 2009-2010, 2011-2012 et 2013-2014 (Fig.234).

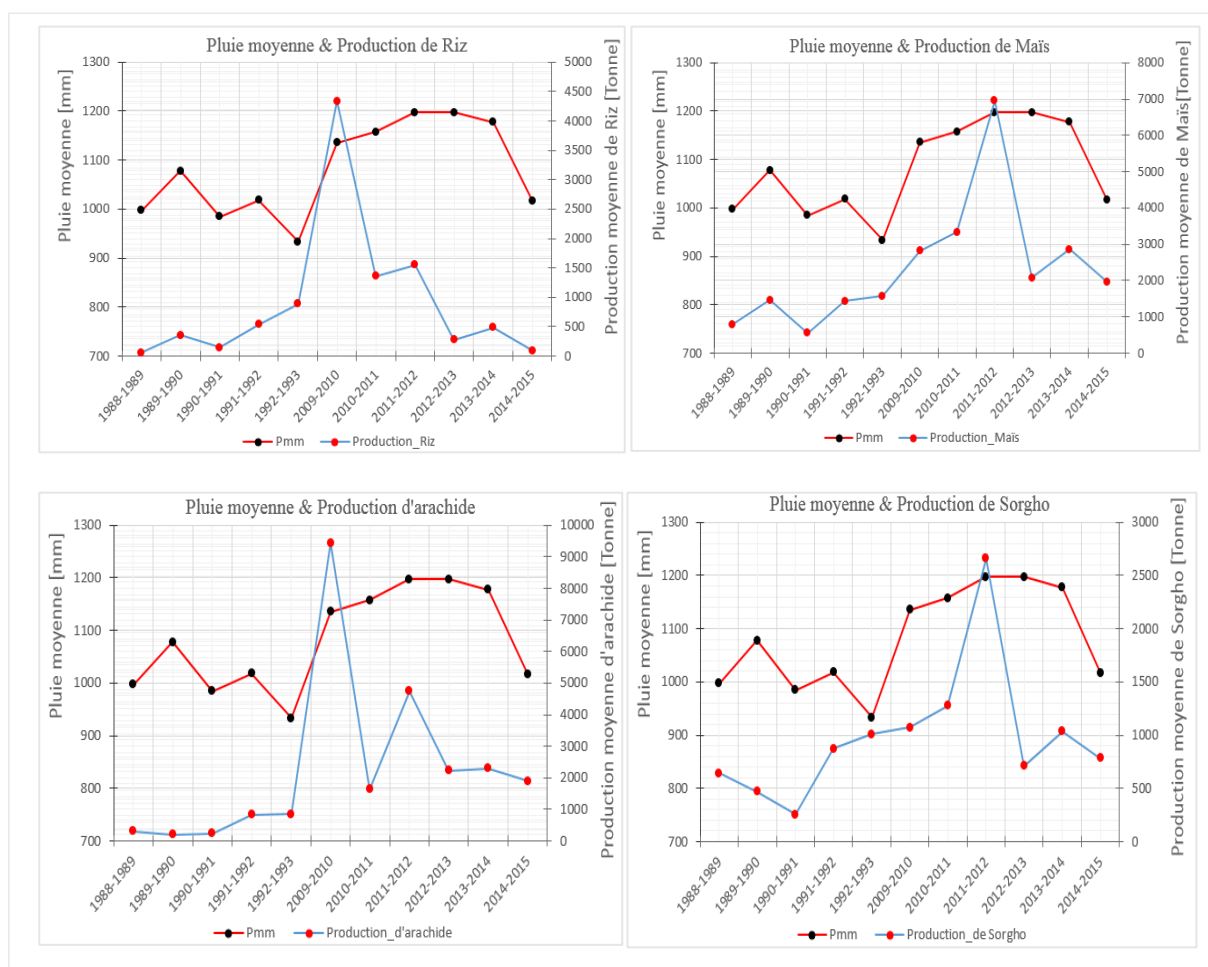


Figure 234. Courbe de variation pluie moyenne et production de chaque spéculat.

Toutefois, les résultats des corrélations entre pluviométrie et production de chaque spéculation (Fig.235) montrent que la pluie moyenne n'est pas le seul facteur qui influence les rendements agricoles. D'autres facteurs sont à prendre en compte comme la bonne distribution spatiotemporelle des pluies (régularité des pluies est plus importante que la quantité de pluie tombée), le choix des variétés culturales, la technicité des agriculteurs qui valorisent la terre, les moyens mis en œuvre pour accroître la production (intrants de bonne qualité, engrais, conception d'ouvrages hydroagricoles), sans oublier les contraintes physiques telles que l'érosion hydrique et l'ensablement qui peuvent impacter sévèrement les performances agricoles.

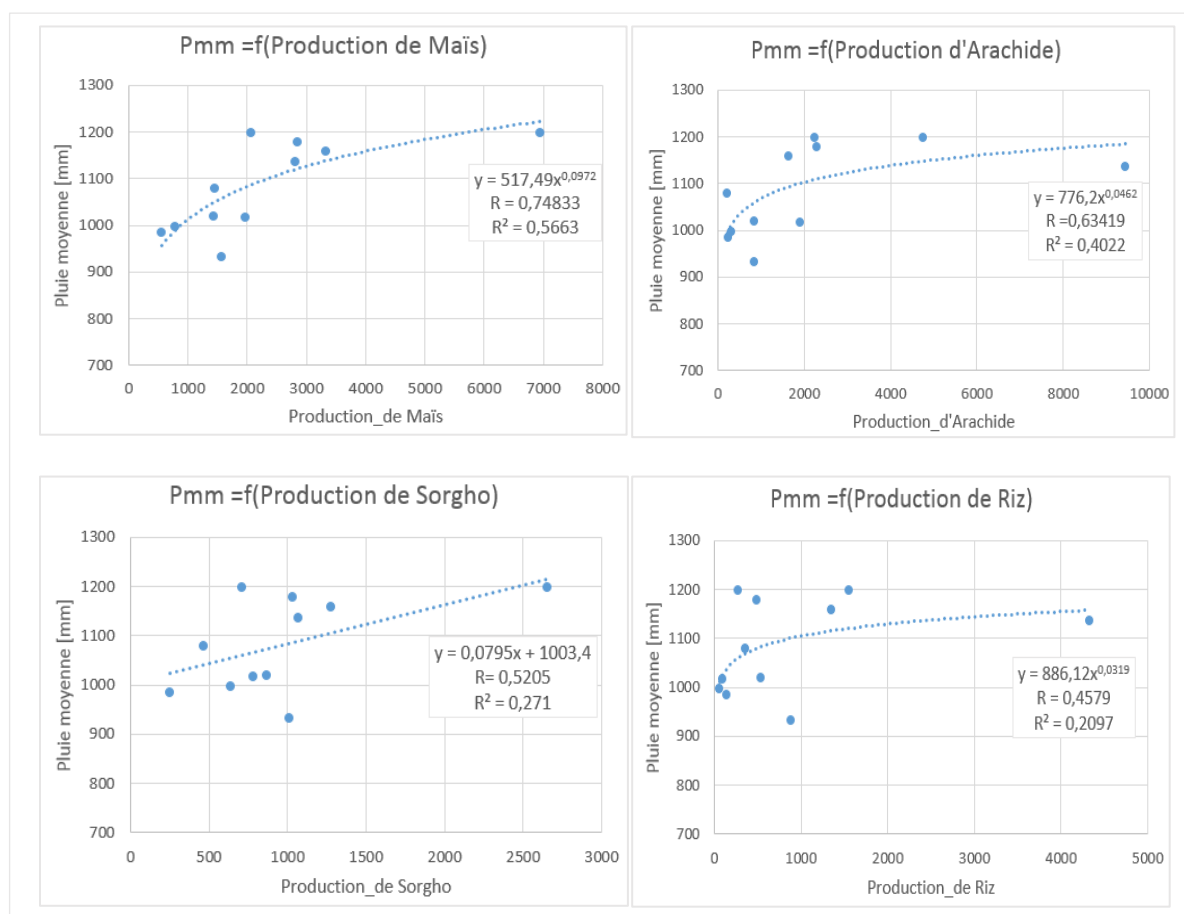


Figure 235. Corrélation entre pluviométrie et production de chaque spéculation.

VIII.4. Le système poste-récolte

Les rendements agricoles sont d'abord destinés à renforcer la résilience des exploitants des bas-fonds du bassin versant du Diarha à l'insécurité alimentaire et nutritionnelle. Les résultats des enquêtes de terrain révèlent que 68% de la production est destinée à la consommation et 32% à la vente (Fig.236). Une partie des rendements destinée à l'autoconsommation est bien conservée et sert de semences pour la saison suivante.

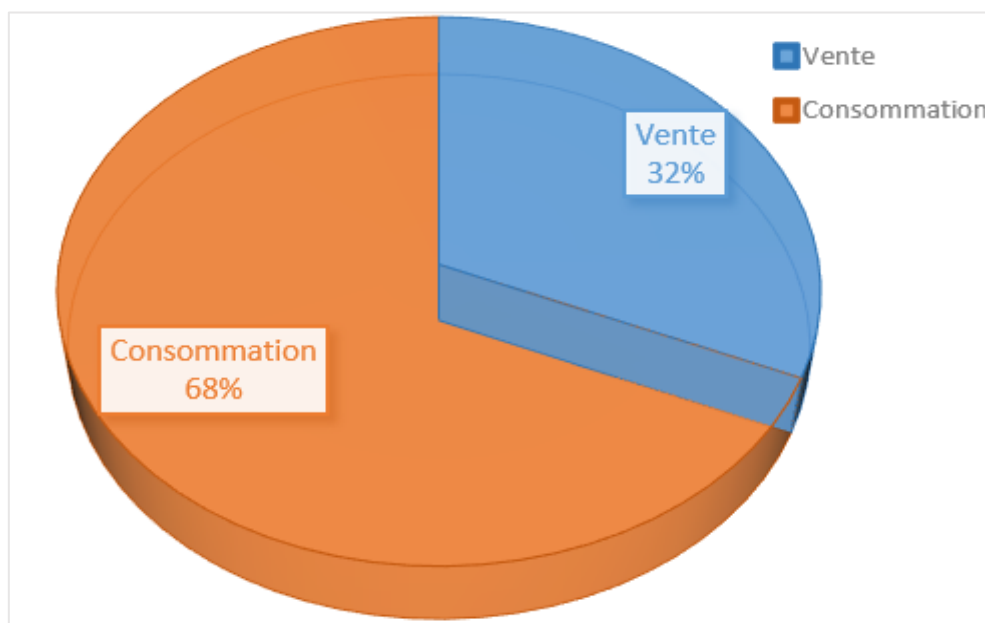


Figure 236. Poids de l'autoconsommation et de la vente

Ce sont généralement les cultures maraîchères et les produits de l'agroforesterie tels que le karité, le miel, le pain de singe, et le « madd » qui sont destinés à la commercialisation. Ces activités sont plutôt réservées aux femmes qui s'organisent en GPF pour mieux exploiter les ressources offertes par les bas-fonds du Diarha. Les enquêtes menées sur le terrain ont permis d'identifier 17 Groupements de Productrices de Karité (GPK) et 26 GPF orientés dans la production maraîchère au niveau du département de Salemata. Ces groupements de femmes sont encadrés par le PROMER, la CARITAS, Wula-nafaa/USAID et l'ONG la-Lumière dans leur système de production.

Le fort taux de l'autoconsommation laisse une faible part à la commercialisation. Ce qui fait que 92% des récoltes destinées au commerce sont vendues au sein même des villages et dans les marchés hebdomadaires les plus proches (loumas de Salemata et de Thiokoye). Le marché urbain n'accueille que 8% des produits de ventes (Fig.237). La commercialisation des produits se fait par kilogramme et par sac.

Photo 6. Cultures commerciales dans les bas-fonds du Bilèle

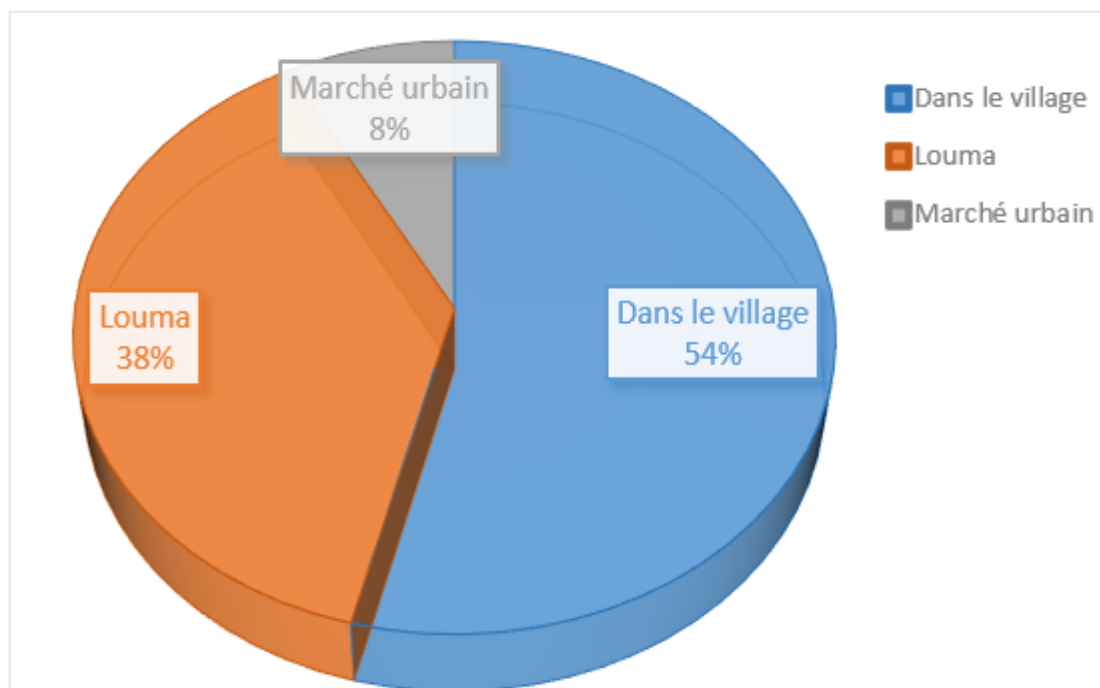


Figure 237. Lieux de vente des produits agricoles

VIII.5. L'eau dans les bas-fonds

Cette étude s'intéresse à la perception des exploitants agricoles des bas-fonds du bassin versant du Diarha de la variabilité des ressources en eau, ses impacts potentiels sur l'écologie et les cultures, les stratégies d'adaptation et les relations qui existent entre ces différents aspects. Les enquêtes de terrain menées auprès de ces exploitants a permis d'identifier leur perception de la disponibilité des ressources en eau, les facteurs influents et le choix des stratégies d'adaptation.

L'étude montre que 96.7% des agriculteurs perçoivent une baisse des pluies et une hausse des températures. Ces tendances sont liées, d'après la population interrogée, aux feux de brousse récurrents, aux défrichages et à la déforestation. Elles se traduisent par l'ensablement très fréquents des rizières et un tarissement précoce des sources d'eau. Les exploitants estiment, par ailleurs, que la reforestation, la promotion des cultures à courts cycles, la conception d'aménagements hydroagricoles et l'adoption de techniques de conservation des sols comme la jachère et le brûlis seraient les meilleurs des stratégies d'adaptation. Toutefois, il faut noter le niveau d'instruction très faible ou limité des exploitants (51% d'analphabètes ; 25% ont arrêté leurs études à l'élémentaire et 15% au collège) (Fig. 238), et que donc l'adoption d'une stratégie d'adaptation dépend de la perception de chaque producteur de la variabilité des ressources, les facteurs influents, les impacts sur l'environnement et les moyens disponibles pour apporter des solutions.

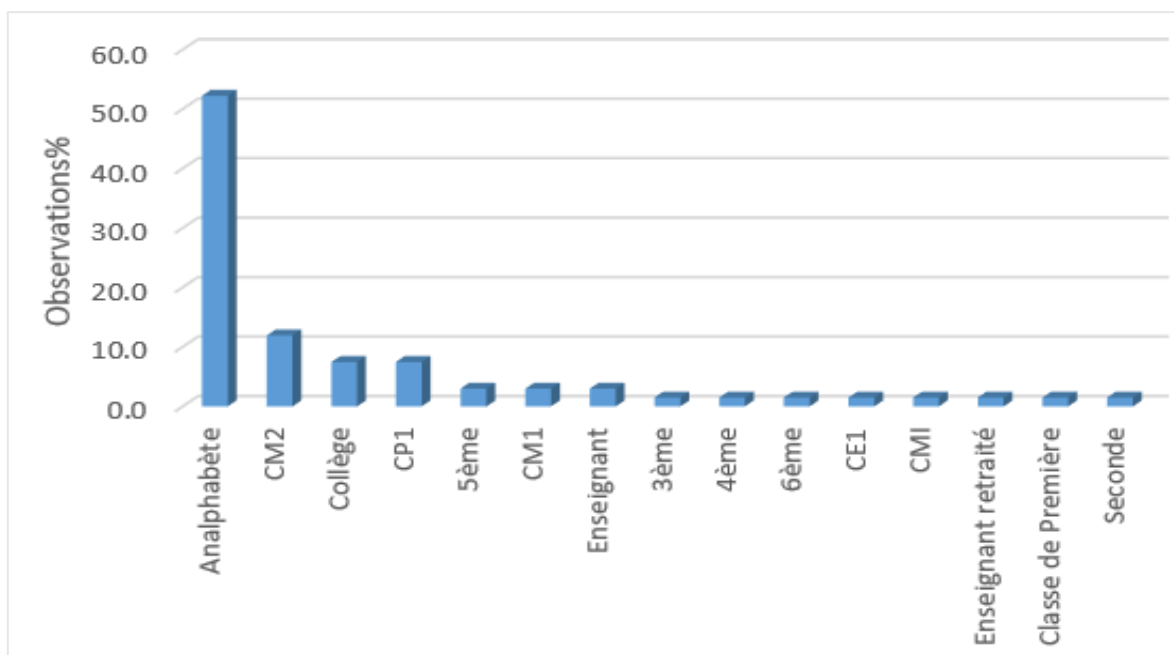


Figure 238. Niveau d'instruction des exploitants des bas-fonds

Chez les Bassaris, il a été question, afin de répondre à leurs besoins sans cesse croissant de ressources, d'abandonner les versants au profit des bas-fonds et cela pour deux raisons :

- la première est relative à la baisse et la mauvaise répartition des ressources en eau consécutive à la grande sécheresse des années 1970 ; et devant l'impossibilité de forer des puits dans les schistes ou quartzites, la stratégie adoptée fut de se rapprocher des puits de bas-fonds.
- la seconde a rapport à la culture du coton, très exigeante en eau, et corollairement requiert une certaine technicité et d'instruments modernes.

Par la même occasion, la ruée des acteurs dans l'espace des bas-fonds entraîne la baisse de la fertilité des sols et donc des rendements agricoles si des mesures conservatoires ne sont pas appliquées. Ainsi, 55% des producteurs font usage de produits chimiques (Fig.239) dont les plus utilisés sont les herbicides (propanyl- calliherb), le MPK triple 15, l'urée et les insecticides. Par contre, les exploitants qui n'ont pas les moyens de se les payer ont recours à l'engrais vert, généralement le compost ou la fumure organique des bovins et caprins, pour accroître la productivité des sols et les rendements agricoles.

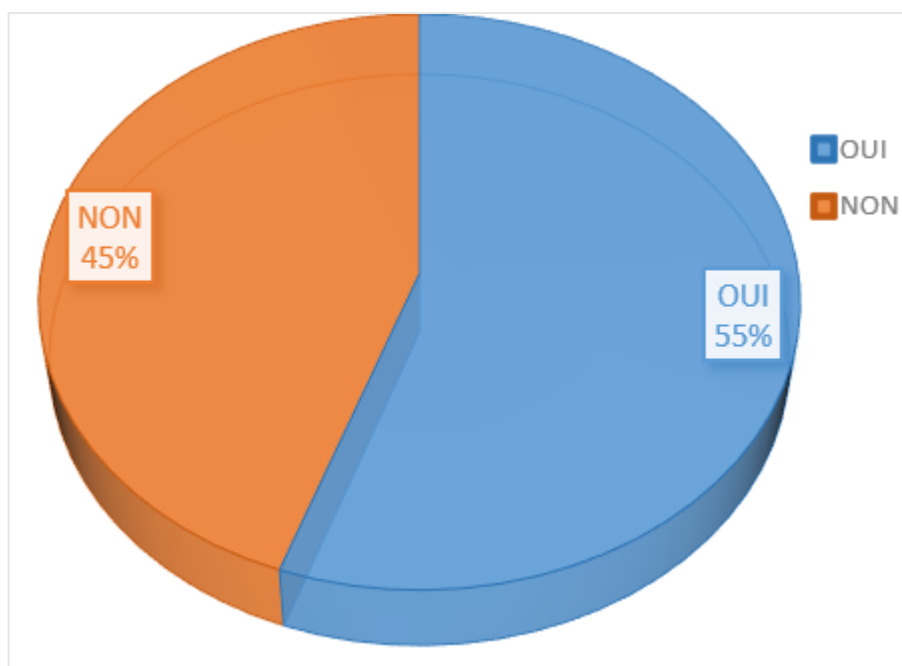


Figure 239. Usage de fertilisants agricoles

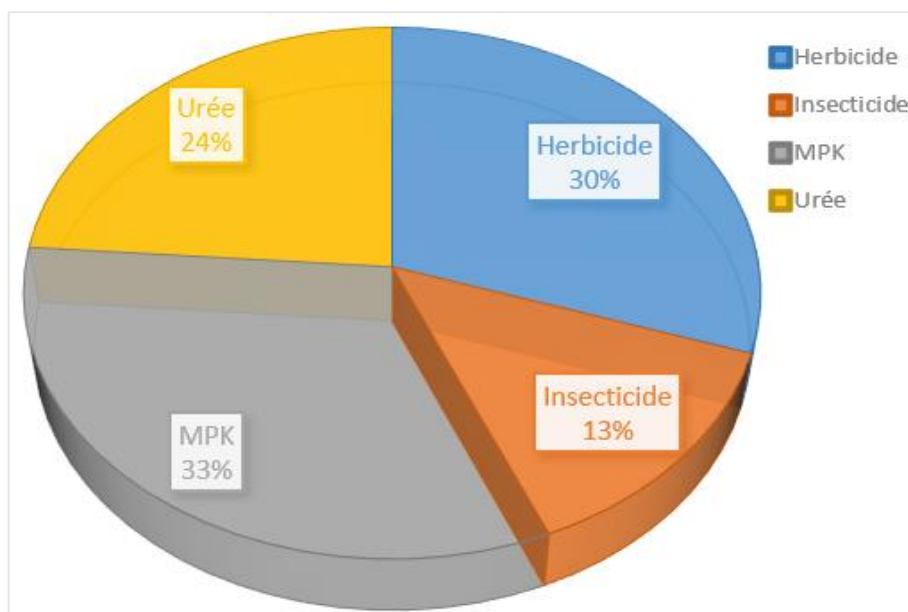


Figure 240. Les produits chimiques utilisés dans la mise en valeur

VIII.5.1. Modes d'accès à l'eau dans les bas-fonds

L'eau occupe une place centrale dans l'économie rurale du bassin versant du Diarha. Mais, c'est surtout en saison sèche que les pressions sur les ressources en eau des bas-fonds sont plus marquées : de l'eau pour les hommes et les animaux, pour les besoins agricoles, sans compter les ponctions de la végétation et la demande de l'atmosphère.

Dès les débuts de la campagne agricole, l'eau utilisée pour arroser les pépinières provient directement des bas-fonds qui ne sont pas encore taris. Ces zones accueillent également les pasteurs pour l'abreuvement du bétail. Cependant, lorsque les sources s'assèchent, vers le mois de mars, les maraîchers utilisent généralement les puits et les céanes pour l'arrosage des pépinières car les ouvrages hydroagricoles sont presque inexistants. Ces puits et céanes sont accompagnés de petits bassins répartis dans les parcelles pour faciliter l'arrosage des pépinières. Pour extraire l'eau des sources, les exploitants pratiquent l'exhaure manuelle.

En outre, les enquêtes de terrain ont aussi révélé que l'accès à l'eau potable se pose avec acuité dans la zone. Seuls les centres urbains (Salemata et Termessé) sont raccordés aux branchements sociaux sensés distribués de l'eau "potable". Ce qui fait que lorsque les puits tarissent, il arrive même que les populations utilisent l'eau des cours d'eau pour la boisson et la lessive (Photo 7).

Photo 7. Modes d'accès à l'eau dans les bas-fonds du Diarha

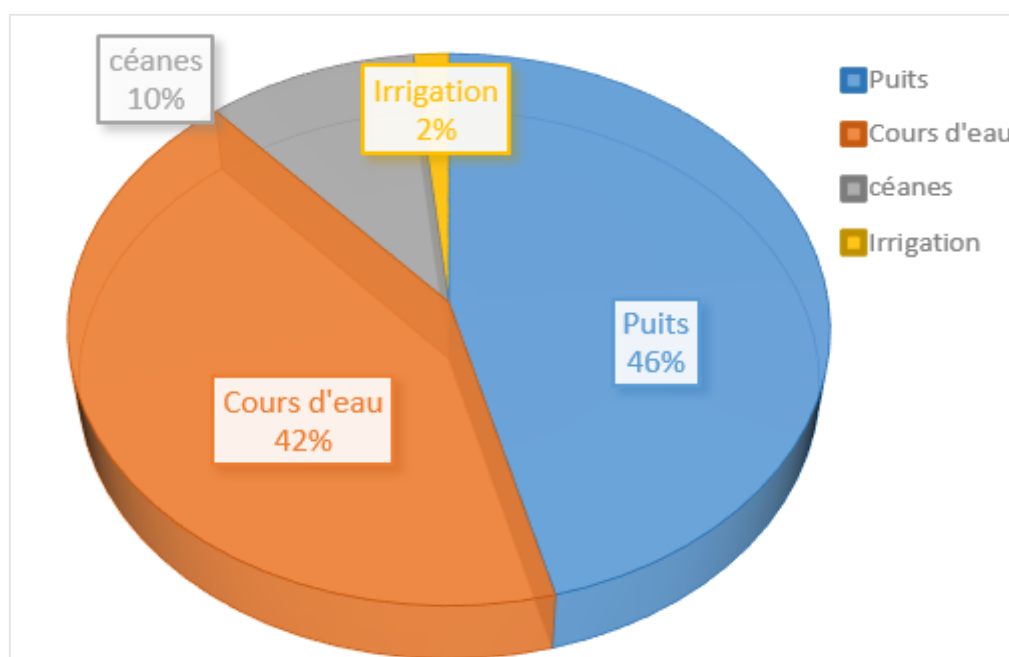


Figure 241. Sources de l'eau pour les cultures maraîchères

VIII.6. Les contraintes à la mise en valeur des bas-fonds

La valorisation des ressources en eau des bas-fonds du bassin versant du Diarha est confrontée à de nombreuses contraintes qu'on peut sérier en deux catégories : les contraintes naturelles imposées par le milieu et les contraintes techniques liées au mode d'exploitation et de gestion. Notre objectif n'est pas de dresser la liste exhaustive de l'ensemble des problèmes liés à l'exploitation des bas-fonds. D'ailleurs, ces contraintes ont été bien identifiées dans les travaux d'Albergel J., Lamachère J. M., Gadelle F., *et al.* (1993) ; Thioubou A., (1995) et de Konaté L., (1997), mais aussi dans nos travaux antérieurs dans le bassin versant du Diarha (Thiaw I. et Dacosta H., 2017).

VIII.6.1. Les contraintes naturelles

Les contraintes naturelles de la mise en valeur des bas-fonds sont surtout liées à l'eau et aux adventices.

VIII.6.1.1. L'eau

C'est une question extrêmement sensible. Elle est certes présente en quantité suffisante, mais sa répartition spatiotemporelle induit un déséquilibre saisonnier avec des situations extrêmes qui placent les populations locales dans une situation inconfortable. En effet, entre juin et décembre, le Diarha écoule 98% de ses disponibilités en eau de surface au moment où la pression sur ces ressources est quasi nulle, c'est-à-dire la saison des pluies et la fin de celle-ci. Entre janvier et mai, il ne reste plus que 2% de disponibilité face à des besoins amplifiés par la saison sèche. Ces faibles apports du cours d'eau interdisent toutes activités de type agricole ou pastoral. C'est ainsi que s'expliquent la transhumance et la quasi-absence des activités maraîchères que les hommes accusent de sources de gaspillage de l'eau.

Toutefois, il faut noter que quelques aménagements hydroagricoles ont été réalisés par le PADAER, en partenariat avec le P2RS et BAMTAARE-SODEFITEX pour tenter de lever ces contraintes et renforcer la résilience des populations locales du bassin du Diarha à l'insécurité alimentaire. Au total 43.7 hectares des bas-fonds du Diarha, répartis entre les sites de Thiankoye (9 ha), Lally (8.2 ha), Dar Salam (8 ha), Diouguel (6 ha), Outiounbel (6 ha), Banfarato (4.3 ha), et Leybar (2.2 ha) ont été aménagés ; ce qui représente à peine 0.2% du potentiel global en bas-fonds du bassin versant du Diarha. Ces aménagements sont constitués de digues de protection et d'aménagements terminaux.

- Les digues de protection protègent les périmètres irrigués contre l'érosion et l'ensablement. Elles permettent également d'améliorer le contrôle de la lame d'eau au niveau du périmètre. Des ouvrages de prise en seuil filtrante permettent d'alimenter le périmètre à partir des eaux de ruissèlement et un ou des ouvrage (s) de vidange au niveau des points bas pour assurer l'évacuation du surplus d'eau dans le périmètre. Les ouvrages de vidange sont des déversoirs linéaires en béton munis de deux buses PVC 110.
- Le principe des aménagements terminaux consiste à découper la superficie en casiers rizicole délimité par des diguettes en terre de largeur de 50 cm et de hauteur de 40 cm par rapport au niveau de la parcelle. Outre son objectif de délimitation des parcelles, ces diguettes permettent d'écarter les crues, de mieux répartir l'eau sur l'ensemble de la rizière et de maintenir les lames d'eau de façon plus ou moins continue. Ces diguettes constituent également des pistes d'accès aux parcelles. La circulation de l'eau d'un casier à l'autre est facilitée grâce à l'existence de tuyaux en PVC placés à travers les diguettes de séparation, facilement manipulables par les exploitants agricoles (fermeture par simple bouchage à l'aide de mottes de terre).

VIII.6.1.2. Les adventices

En matière agricole, après le problème de l'eau, c'est celui des adventices qui vient renflouer la liste des obstacles à l'aménagement.

Le "*gainal*" ou "*lay-lay*" (mauvaise herbe en langue locale) occasionne un surplus de travail. Trente jours environ sont accordés au désherbage d'une parcelle de moins d'un hectare, à défaut d'herbicides. De ce fait, le riz dont le désherbage manuel exige patience et labeur devient une activité strictement féminine.

VIII.6.2. Les contraintes techniques

Elles sont le plus souvent liées à l'encadrement et aux techniques culturales.

L'encadrement est souvent assuré le PROMER, la CARITAS, Wula-nafaa/USAID et l'ONG la-Lumière qui interviennent dans la formation des GPF et GIE à la transformation des produits agricoles et forestiers ; mais, à peine 5% de ces acteurs reconnaissent avoir bénéficié de leurs supports.

Les paysans sont laissés à leur seul savoir-faire et c'est pourquoi, les techniques culturales utilisées dans la mise en valeur des bas-fonds du Diarha paraissent des plus primitives (charrue, daba, houe, semis à la volée...). La conséquence majeure qui en résulte, c'est le choix qui s'impose aux exploitants obligés de se passer du labour pour certaines cultures, généralement le sorgho. C'est ce qui explique que le semis à la volée et le semis en poquets dominent largement sur le semis en ligne continue.

Tableau 104. Synthèse des contraintes de la mise en valeur des bas-fonds

Type de contraintes	
Economiques	- Manque de matériels agricoles modernes (tracteurs, motopompes...) - Manque d'intrants
Humaines	- Manque d'encadrement et d'assistance technique - Divagation des animaux - Feux de brousse et défrichage - Faible présence des ONG et projets de développement
Naturelles	- Mauvaise répartition des ressources en eau - Tariessement précoce - Ensablement due à l'érosion hydrique - Adventices - Insectes - Variabilité hydroclimatique

VIII.7. Les perspectives et stratégies d'adaptation

Dans le bassin versant du Diarha, la mise en valeur des bas-fonds permet de pallier le déficit agricole observé au niveau des versants et offre des modes d'exploitation diverses. Cependant, la valorisation de ces écosystèmes reste confrontée à de nombreux handicaps parmi lesquels la non maîtrise des eaux reste la principale contrainte de mise en valeur des bas-fonds. Pour lever ces contraintes il faudrait :

- **Dans le domaine de l'eau**

- Densifier le réseau de mesure pour améliorer l'information hydrométrique et pluviométrique du bassin.
- Tenir compte du climat dans les politiques de gestion et d'exploitation durable des ressources en eau en vue de réduire la vulnérabilité des systèmes écologiques à l'irrégularité des pluies et la variabilité des écoulements.
- Maîtriser la dynamique du ruissèlement en multipliant les ouvrages de captage des eaux pour une utilisation optimale et prolongée jusque tard dans la saison sèche.
- L'instauration de techniques appropriées de lutte antiérosive avec la mise en place de cordons pierreux ou de haies vives à fonction double sur l'eau et les sols.

- **Dans le domaine socio-politique**

- Pérenniser les systèmes sociaux grâce à la valorisation des ressources humaines ;
- Promouvoir une gestion efficiente et intégrée des ressources ;
- L'Etat, par le biais des collectivités locales, les opérateurs économiques et les ONG devraient accompagner et encadrer les agriculteurs à travers des subventions (intrants, semences et matériels agricoles modernes), des financements et des sessions de formation dans le but d'augmenter la production agricole des bas-fonds ;
- Faciliter l'écoulement des spéculations agricoles.

- **Dans le domaine pédologique**

L'objectif est d'accroître la fertilité des sols. Les techniques antiérosives permettent déjà de surmonter la couche arable déblayée par les eaux de ruissèlement. Cependant, il faut surtout miser sur l'amélioration des techniques culturales par :

- la généralisation du labour qui favorise une bonne infiltration des eaux ;
- L'intensification et l'utilisation autant que possible des engrais verts ;
- Et par le bannissement de l'abattage anarchique et le maintien d'arbres pour la production de litières et de matières organiques.

Conclusion

Les bas-fonds du bassin versant du Diarha sont le siège de toutes les activités traditionnelles (agriculture, pastoralisme, maraîchage et agroforesterie). Un espace pluriethnique où se côtoient Bassaris, Bedik, Peulh et Diakhanké pour pallier le déficit agricole noté au niveau des versants et renforcer, ainsi, leur résilience à l'insécurité alimentaire. Toutefois, comme tout système naturel, la gestion et l'exploitation durables de ces unités sont assujetties à des contraintes parmi lesquelles celles relatives à la maîtrise de l'eau constituent le principal obstacle à la mise en valeur optimale. L'eau est certes présente en quantité suffisante, mais sa répartition spatiotemporelle induit un déséquilibre saisonnier avec des situations extrêmes qui placent les populations locales dans une situation inconfortable. À cela s'ajoute la faiblesse du système d'appui en termes d'encadrement technique des producteurs, de soutiens matériels et/ou financiers (intrants, semences et matériels agricoles modernes) qui réduit considérablement les performances agricoles. C'est ainsi que s'explique le fort poids de l'autoconsommation et la quasi-absence des activités maraîchères.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les bas-fonds du bassin du Diarha sont des hydrosystèmes où les potentialités agronomiques, hydrologiques et sylvopastorales sont favorables à la diversification et à l'intensification agricole. La caractérisation d'ensemble de ces milieux, au moyen de la Télédétection et des Systèmes d'Information Géographiques, couplés aux enquêtes quantitatives a permis de mieux comprendre les stratégies paysannes mises en œuvre pour valoriser les potentialités offertes par les agroécosystèmes de bas-fonds. Mais, comme tout système naturel, la gestion et l'exploitation durables de ces unités sont assujetties à des contraintes parmi lesquelles celles relatives à la maîtrise de l'eau constituent le principal obstacle à la mise en valeur optimale. En effet, l'analyse du climat et de sa trame ont montré l'impact négatif de la récession pluviométrique sur les ressources en eau des bas-fonds du bassin du Diarha. Trois séquences de l'évolution des modules ont été observées :

- De 1961 à 1967 : phase à forte hydraulicité (excédentaire) durant laquelle les modules moyens excèdent de 34% le module interannuel ($7,3 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- De 1968 à 1993 : phase à faible hydraulicité (déficitaire) avec une baisse de 18% des écoulements du Diarha. Ce déficit est à mettre en rapport avec la longue sécheresse qui a frappé le bassin du Diarha sur cette période, occasionnant une baisse de 11% des précipitations.
- Enfin, de 1994 à 2012, une reprise des écoulements se manifeste, mais avec une grande variabilité interannuelle, marquée notamment par une forte sécheresse en 2002. Durant cette période, les modules moyens excèdent de 12% le module interannuel ($7,3 \text{ m}^3/\text{s}$), mais sans retour à l'hydraulicité d'avant la sécheresse.

A l'échelle saisonnière, l'analyse des écoulements du Diarha a montré que l'essentiel des apports est concentré sur quatre mois (juillet à octobre) période pendant laquelle la pression sur les ressources en eau de surface est quasi nulle. Ce déséquilibre dans la répartition des écoulements impacte fortement toutes les activités économiques (agriculture, pastoralisme, commerce...) dans le bassin. En outre, le changement climatique a un impact significatif sur les flux futurs (horizon 2050) du Diarha, comparés aux conditions de base. Sous le scénario d'émission RCP4.5, une baisse des débits moyens annuels de 0.5, 1.5 et 12.4% a été prédite par le modèle GR4J, en réponse aux projections climatiques générées par les modèles GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-LR et INM-CM4, respectivement. Cette baisse résulterait d'une hausse des températures de 0.9, 1.4 et 1.7°C et d'une diminution des précipitations de 0.37, 0.43 et

5.42%, respectivement pour les mêmes scénarios de modèles. Un doublement du CO₂ atmosphérique à 660 ppm (RCP8.5) a montré une baisse des débits moyens annuels de 17.4% pour le modèle GFDL-ESM2G, 21.2% (IPSL-CM5A-LR) et 35.2% (INM-CM4), en réponse à la diminution des précipitations de 7.6, 12.1 et 17.2% prévue par les scénarios de ces modèles. Ces résultats montrent la forte sensibilité des débits du Diarha aux caractéristiques des sorties des Modèles Climatiques Régionaux (RCM) utilisés.

Les scénarios prévoient, au-delà de la baisse des débits moyens annuels, une baisse chronique des débits caractéristiques (D_{MAX}, DCC_10j, DCC_20j, DC1, DC2 et DC3) dans les deux scénarios d'émission. Les résultats de la simulation projettent une baisse de 9% des débits journaliers maximums (D_{MAX}) pour le modèle GFDL-ESM2G, 59% pour INM-CM4, sous le scénario RCP4.5. La moyenne d'ensemble (moyenne des trois RCM) avec RCP4.5 prévoit une baisse respective de 15% et 14% des débits de pointe atteints ou dépassés pendant dix jours (DCC_10j) et vingt jours (DCC_20j) ; et de 16%, 20% et 7% successivement des débits caractéristiques atteints ou dépassés pendant un mois (DC1), deux mois (DC2) et trois mois (DC3). La baisse des débits caractéristiques est plus prononcée sous le scénario RCP8.5. Les modèles GFDL-ESM2G et INM-CM4 prévoient respectivement une baisse de 35% et 47% (D_{MAX}) ; 24% et 97% (DCC_10j) ; 30% et 93% (DCC_20j) ; 27% et 98% (DC1) ; 27% et 63% (DC2) ; et de 4% et 11% (DC3). Quant au modèle IPSL-CM5A-LR, il prévoit et une baisse chronique des DCC_10j (57%), DCC_20j (86%), DC1 (96%) et des DC2 (62%), à l'horizon 2050. La moyenne d'ensemble, avec RCP8.5, subit une baisse de 41% (D_{MAX}), 59% (DCC_10j), 70% (DCC_20j et DC1), 51% (DC2) et de 7% (DC3). Ces résultats suggèrent l'importance d'intégrer cette analyse dans les politiques de gestion et d'exploitation durables des ressources en eau des bas-fonds du bassin versant du Diarha en vue de réduire leur vulnérabilité à l'irrégularité des pluies et la variabilité des écoulements.

Cette forte variabilité hydroclimatique et les conséquences qui en découlent en termes de dégradation du paysage (rareté de l'eau, ensablement, dégradation des ressources forestières, baisse de la productivité des sols et des rendements agricoles...) n'ont pas laissé les paysans Peulh et Bassaris dans l'oisiveté. Ils cherchent à être une pièce centrale de la dynamique des bas-fonds du bassin versant du Diarha en élaborant différentes stratégies dites spatiales. La mise en valeur des bas-fonds, jadis dominée par les cultures vivrières et l'élevage, se voit aujourd'hui animée par les cultures commerciales, et fait émerger la nécessité d'un rééquilibrage des relations entre les différentes activités. Cela doit passer par une harmonisation des stratégies de gestion et d'exploitation des ressources impliquant tous les acteurs, mais aussi par

l'optimisation de la disponibilité de l'eau. Cette étude sur les bas-fonds du bassin versant du Diarha n'est pas exhaustive. Elle ouvre d'autres pistes de recherche notamment :

- L'adéquation entre la demande en ressources par les populations locales et l'offre des systèmes écologiques surtout dans un contexte climatique changeant ;
- Les sciences et technologies de l'espace dans la dynamique d'occupation des sols des agroécosystèmes de bas-fonds.
- Des études complètes sur le fonctionnement des bas-fonds devraient être envisagées dans les bassins versants des formations du socle et de sa couverture paléozoïque, comme cela a été faite dans le bassin de Thyse-Kaymor.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AfricaRice (2010) : Rapport de l'atelier final de la phase 1 (2009-2010) du projet RAP : Réalisation du potentiel agricole des zones des bas-fonds en Afrique sub-saharienne tout en maintenant leurs services environnementaux, 72p.
- [2] Ajami, K., Gupta, N., Wagener, H.T., & Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 112–135. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.03.033 [CrossRef]
- [3] Albergel J. (1986) : Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne : exemple du Bourkina Faso ; CIEH-Ouagadougou, 19 pages.
- [4] Albergel, J. et Lamachère, J.M., 1989. LES TYPOLOGIES USUELLES caractérisations géologique et climatique Albergel & Claude. ORSTOM.
- [5] Albergel, J., Bernard, A., Dacosta, H., & Pépin, Y. (1990). Rapport hydrologique 1989 : bassins versants de Thyse-Kaymor: action de recherche" DRS-Economie de l'eau".
- [6] Albergel J, Bernard A, Dacosta H, Dubée G, Pépin Y, Saos J-L. (1991) : Projet Pilote « Sine-Saloum » : bas-fond de Thyse-Kaymor. Rapport de synthèse. Hydrologie-Hydrogéologie ORSTOM, Dakar, 33 p.
- [7] Albergel J., Dacosta H. and Pepin Y. (1992). Régionalisation des paramètres hydrologiques à prendre en considération pour l'aménagement d'un bas-fond rizicole dans l'estuaire de la Casamance (Sénégal). Huitièmes journées hydrologiques de Montpellier. Régionalisation en hydrologie - Application au développement. Edit. Le Barbé L. et Servat E, Collection Colloques et Séminaires ORSTOM, pp. 363-383.
- [8] Albergel, J., Lamachère, J. M., Gadelle, F., Lidon, B., Mokadem, A. L., Ran, A. M., & Van Driel, W. F. (1993). Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel ; typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. Rapport final d'un projet CORAF-R3S. CIEH.
- [9] Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, D., and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. And Drain. Paper 56, Food and Agric. Orgn. Of the United Nations, Rome, Italy. 300 pp.
- [10] Anderson, R. M., Koren, V. I., & Reed, S. M. (2006). Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 103–116. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.020 [CrossRef]
- [11] Andriesse, W. 1986. Area and Distribution. In: *The Wetlands and Rice in Sub-Saharan Africa*. pp. 15-30; A.S.R. Juo and J.A. Lowe (Eds.). IITA, Ibadan, Nigeria
- [12] ANSD-Février (2016). Rapport projection de la population du Sénégal, 168p
- [13] Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J. E., Mahé, G., Niel, H., & Dieulin, C. (2009). Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 77–89. doi:10.1623/hysj.54.1.77 [CrossRef]
- [14] Arnold, J. G., Williams J. R., Srinivasan R., King K. W., and Giggs R. H., 1995. SWAT Soil and Water assessment Tool: draft user manual, US department of Agriculture, Agriculture Service. Temple, TX.

- [15] Arnoldus H. M. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In Assessments of Erosion, de Boodts M, Gabriels D (Eds). John Wiley and Sons Ltd, Chichester 127–132.
- [16] Azari, M., Moradi, H. R., Saghaian, B., & Faramarzi, M. (2015). Climate change impacts on streamflow and sediment yield in the North of Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 61(1), 123–133. doi:10.1080/02626667.2014.967695 [CrossRef]
- [17] Baba Hamed K. & Bouanani, A. 2016 : Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna. (Nord-ouest algérien) ; Tome 4, pp. 277-286
- [18] Baillargeon S., (2005) : Le krigeage : revue de la théorie et application µa l'interpolation spatiale de données de précipitations, Mémoire Maîtrise en statistique, Faculté des Sciences et de Génie Université de Laval Québec, 128 pages.
- [19] Balde, Y., & Girard, M. C. (1982). Classification of soils of Guinea (2nd approximation) and their evaluation for agricultural use. *Bulletin SENASOL (Guinea)*.
- [20] Bamba S. B., 1987. Le bilan de L'eau et de la matière dans le haut bassin guinéen du fleuve Gambie. UCAD, doctoral, thesis. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-09/24301.pdf [in French]
- [21] Bassot J. (1966) : Etude géologique du Sénégal oriental et de ces confins guinéo-maliens, BRGM, Paris 280 pages.
- [22] Bassot J. (1969) : « Aperçu sur les formations précambriennes et paléozoïques du Sénégal oriental ». In *Bulletin Société de Géologie française*, (7), 11, pp. 160-169.
- [23] Berton S. (1988) : La maîtrise des crues dans les bas-fonds, petits et micro-barrages en Afrique de l'Ouest ; GREF, CF, ACCT 475 pages.
- [24] Biao, E. (2017). Assessing the Impacts of Climate Change on River Discharge Dynamics in Oueme River Basin (Benin, West Africa). *Hydrology*, 4(4), 47. Doi : 10.3390/hydrology4040047 [CrossRef]
- [25] Blasone, R.-S., Madsen, H., & Rosbjerg, D. (2007). Parameter estimation in distributed hydrological modeling: comparison of global and local optimisation techniques. *Nordic Hydrology*, 38(4-5), 451. doi:10.2166/nh.2007.024 [CrossRef]
- [26] Bodian A., Dacosta H., et Dezetter A., (2011) : « Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 5 | 2011, mis en ligne le 25 juillet 2011, Consulté le 05 septembre 2011, URL : <http://physio-geo.revues.org/1958> ; DOI : 10.4000/physio-geo. 1958.
- [27] Bodian, A.; Dezetter, A.; Dacosta, H.; Ardoin-Bardin, S., (2013). Impact du changement climatique sur les ressources en eau du haut bassin du fleuve Sénégal. *Rev. Géogr. Lab. Leïd*. 2013, 2515, 236–251. [In French]
- [28] Bodian, A., Dezetter, A., & Dacosta, H. (2015). Rainfall-runoff modeling of water resources in the upper Senegal River basin. *International Journal of Water Resources Development*, 32(1), 89–101. doi:10.1080/07900627.2015.1026435 [CrossRef]
- [29] Bodian, A., Dezetter, A., Diop, L., Deme, A., Djaman, K., & Diop, A. (2018). Future Climate Change Impacts on Streamflows of Two Main West Africa River Basins: Senegal

- and Gambia. *Hydrology*, 5(1), 21. Doi : 10.3390/hydrology5010021 [CrossRef]
- [30] Bop, M.; Amadou, A.; Seidou, O.; Kébé, C.M.F.; Ndione, J.A.; Sambou, S.; Sanda, I.S. Modeling the Hydrological Dynamic of the Breeding Water Bodies in Barkedji's Zone. *J. Water Resour. Prot.* 2014, 6, 741–755. [Google Scholar] [CrossRef]
- [31] Boufeev, Y.B. (2006) Notice explicative de la carte géologique de la République de Guinée au 1/500 000. Service Géologique de Guinée
- [32] 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 p.
- [33] Brulebois E. (2016). Impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne : aspects quantitatifs et qualitatifs. *Sciences de la Terre*. Université de Bourgogne. Français. <NNT : 2016DIJOS027>. <tel-01488290> [Google Scholar]
- [34] Brunet-Moret Y., (1969) b : Homogénéisation des précipitations, Cahiers ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XVI, n° 3 et 4, 1979, 24 p.
- [35] Brunet-Moret Y., (1977): Test d'homogénéité. Cah. ORSTOM, Hydrol. Vol. XIV, n° 2, pp 119-129
- [36] Brunet-Moret Y., (1979) : Homogénéisation des précipitations, Cahiers ORSTOM, série hydrologie, vol, XVI, n° 3-4, p, 144-170.
- [37] Buishand T.A., (1982): Some methods for testing the homogeneity of rainfall records, *Journal of Hydrology*, vol. 58, pp., 11-27.
- [38] Buishand T.A., (1984): Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series; *Journal of Hydrology*, vol. 73, p. 51-69.
- [39] Burnash, R. J., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computers. [Google Scholar]
- [40] Burnash, R. J. C. (1995). The NWS River forecast system-catchment modeling. *Computer models of watershed hydrology*, 188, 311-366. [Google Scholar]
- [41] Camus H. et Debuissou J. (1964) : Etude hydrogéologique des terrains anciens du Sénégal oriental. Campagne 1962 ; Ministère de l'énergie et de l'hydraulique, Dakar-BRGM, 143 pages et 2 fascicules.
- [42] Carvalho D. F, Durigon V. L, Antunes M. A. H, Almeida W. S, and Oliveira P. T. S. Predicting soil erosion using Rusle and NDVI time series from TM Landsat 5; *Pesq. Agropec. bras.*, Brasília, v.49, n.3, p.215-224, mar.2014; DOI:10.1590/S0100-204X2014000300008
- [43] CBF (1997) : L'aménagement des bas-fonds, Bulletin du Consortium Bas-fonds, 11p.
- [44] Chauvel A. (1965) : Carte Pédologique de Reconnaissance au 200.000ème Kédougou, Campagne (1964-1965) ; ORSTOM-DAKAR.
- [45] Chauvel A. (1967) : Carte pédologique du Sénégal oriental au 200.000ème. Notice explicative des feuilles de Kédougou et de Kéniéba – Kossanto. Rapport ORSTOM – Dakar, 155 pages

- [46] Chavent, Marie & Kuentz, Vanessa & Saracco, Jérôme. (2007). Analyse en Facteurs : présentation et comparaison des logiciels SAS, SPAD et SPSS.
- [47] Cisse, M. T., Sambou, S., Dieme, Y., Diatta, C., & Bop, M. (2014). Analyse des écoulements dans le bassin du fleuve Sénégal de 1960 à 2008. *Revue Des Sciences de L'eau*, 27(2), 167. Doi : 10.7202/1025566ar [CrossRef] [in French]
- [48] Cosandey C. (2003) : Les eaux courantes. Géographie, Environnement. Paris, Berlin, 239p.
- [49] Cudennec C., 2000. Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse de doctorat de l'ENSAR, Rennes, 198 p.
- [50] Dacosta H. (1989) - Précipitation et écoulements sur le Bassin de la Casamance. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 278 p.
- [51] Dacosta H., Konaté Y.K., et Malou R. (2002) : La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle ; FRIEND 2002 ; Regional Hydrology : bringing the gap between research and practice (proceedings of the fourth international FRIEND conference held at Cape town, South Africa, March (2002); IAHS Publ. N°274, pp. 449-506.
- [52] Dao A., Kamagate B., Mariko A., Tié-Albert G.B, Luc S., Bokar H., Savane I., Variabilité Climatique et Réponse Hydrologique du Bassin Versant Transfrontalier de Kolondieba au Sud du Mali, *European Journal of Scientific Research*; ISSN 1450-216X Vol, 43 No 4, pp 435-444. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>.
- [53] Demangeot, J. (2009). Les milieux « naturels » du globe. Paris : Armand Colin. doi:10.3917/arco.deman.2009.01.
- [54] Déqué M. 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global Planet. Change*, 57: 16-26.
- [55] Descroix L., Diongue Niang A., Panthou G., Bodian A., Sané Y., Dacosta H., Malam Abdou M., Vandervaere J.P. et Quantin G. (2015) - Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le bassin du Niger Moyen. *Climatologie*, vol. 12, p. 25-43. DOI : 10.4267/climatologie.1105
- [56] DGPRES (2015). Étude hydrogéologique hydrologique pour déterminer les potentialités d'alimentation en eau de Kédougou et ses environnants. Rapport de synthèse final, IDEV-IC. 62p
- [57] Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V.K. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015–1031. Doi :10.1029/91wr02985 [CrossRef]
- [58] Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3-4), 265–284. Doi : 10.1016/0022-1694(94)90057-4 [CrossRef]
- [59] Dubreuil (P.), Guiscafne (J.) - 1971 -« La planification du réseau hydrométrique minimal». *Cah. ORSTOM dz. Hydrol.*, vol. VIII, no 1.

- [60] Dubreuil P. (1972) : Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux Années 1951-1969, ORSTOM-PARIS, 916p.
- [61] Duchaufour P. (1965) : Précis de pédologie 2e ed. Paris, Masson, 482p.
- [62] Durigon, V. L.; Carvalho, D. F.; Antunes, M. A. H.; Oliveira, P. T. S.; Fernandes, M. M, 2014. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, v.35, p.441-453. DOI: 10.1080/01431161.2013.871081
- [63] Eckhardt, K., & Arnold, J. G. (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 251(1-2), 103–109. Doi : 10.1016/s0022-1694(01)00429-2 [CrossRef]
- [64] El Garouani, A., Chen H., Lewis L., Triback A. and Abahrour M., 2008, "Mapping of land use and net erosion from satellite images and IDRISI GIS in North-East Morocco", *Remote sensing*, vol. 8, n° 3, p. 193-201
- [65] Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A., & Grouillet, B. (2014). Simulating long-term past changes in the balance between water demand and availability and assessing their main drivers at the river basin management scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(11), 12315–12364. Doi : 10.5194/hessd-11-12315-2014 [CrossRef]
- [66] Fall A. (2014), *Le Ferlo sénégalais. Approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens*, thèse de doctorat, Université Paris 13 Sorbonne Paris-cité, 380 p. [In French]
- [67] Famien, A. M., Janicot, S., Ochou, A. D., Vrac, M., Defrance, D., Sultan, B., and T. Noël (2018). A bias-corrected CMIP5 dataset for Africa using CDF-t method. A contribution to agricultural impact studies. *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, under review, doi:10.5194/esd-2017-111
- [68] FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- [69] Faye, C. (2018). Climatic Variability and Hydrological Impacts in West Africa: Case of the Gambia Watershed (Senegal). *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal*, 2(1), 54-66.
- [70] Fick, S. E and Hijmans R. J., 2017. Wordclim 2: New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*.
- [71] Fotsing, 1993. Érosion des terres cultivées et propositions de gestion conservatoire des sols en pays bamiléké (Ouest-Cameroun), Maison de la Télédétection, laboratoire Orstom, 500, rue J.-F.-Breton, 34093 Montpellier, France. [In French]
- [72] Gan, T. Y., & Burges, S. J. (2006). Assessment of soil-based and calibrated parameters of the Sacramento model and parameter transferability. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 117–131. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.008 [CrossRef]
- [73] Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953–961. doi:10.1016/j.gsf.2015.10.007
- [74] García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A. and Roquier, B. (2018). RS MINERVE – Technical manual v2.13. RS MINERVE Group, Switzerland [Google Scholar]

- [75] Gilks, W. R., Roberts, G. O., & Sahu, S. K. (1998). Adaptive Markov Chain Monte Carlo through Regeneration. *Journal of the American Statistical Association*, 93(443), 1045. doi:10.2307/2669848 [CrossRef]
- [76] Giorgi, F. Jones, C. & Asrar G.R (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bull.*, 58 (3) (2009), pp. 175-183 [View Record in Scopus]
- [77] Gitas L. Z, Douros K, Minakou C, Silleos G.N, and Karydas C.G (2009). Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSeL eProceedings*, 8 (2009), pp. 40-52
- [78] Grecu, F., Zăvoianu, I., Zaharia, L., & Comănescu, L. (2007). Analyse quantitative du réseau hydrographique du bassin versant du Slănic (Roumanie). *Physio-Géo*, (Volume 1), 79–93. doi:10.4000/physio-geo.1051.
- [79] Grouillet B., Ruelland D., Ayar P. V. and M. Vrac (2016). Sensitivity analysis of runoff modeling to statistical downscaling models in the western Mediterranean. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20: 1031-1047
- [80] Guo, L.-Y., Gao, Q., Jiang, Z.-H., & Li, L. (2018). Bias correction and projection of surface air temperature in LMDZ multiple simulation over central and eastern China. *Advances in Climate Change Research*, 9(1), 81–92. doi:10.1016/j.accre.2018.02.003 [CrossRef]
- [81] Gupta, H. V., Bastidas, L. A., Vrugt, J. A., & Sorooshian, S. (2003). Multiple criteria global optimization for watershed model calibration. *Calibration of Watershed Models*, 125–132. doi:10.1029/ws006p0125 [CrossRef]
- [82] Hamadi. H, Chiraz. M. (2003). Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie : estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). *Revue sécheresse* Volume 14, N° 4 : 257-265
- [83] Hekstra P., Andriessse W., 1983. Wetland Utilization Research Project, West Africa. Phase I (The Inventory), Vol. II (The physical Aspects). International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen. The Netherlands. April 1983
- [84] Hekstra, P., W. Andriessse, C.A. de Vries, and G. Bus. 1983. Wetland Utilization Research Project, West Africa. Phase I, the Inventory (4 Vols.). ILRI, Wageningen, The Netherlands
- [85] Horton R.E (1932) Drainage basin characteristics. *Am Geophys Union Trans* 13:348–352.
- [86] Hubert P., Servat E., Paturel J. E., Kouame B., Bendjoudi H., Carbonel J. P., et Lubes-Niel H., (1998) : La procédure de segmentation, dix ans après, *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (proceedings of the Abidjan 98 Conference held al Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998) IAHS, Publ, n° 252, pp. 267-273.
- [87] Hudson, N. W., 1973, Soil conservation, Batsford, London, 320 p.
- [88] INS-Guinée Décembre 2017. Perspectives démographiques de la population de Guinée, 447p.
- [89] IRD (1998)-KhronoStat version 1.0. Logiciel, IRD, Montpellier. IRD, (1998)-

- KhronoStat version 1.0. logiciel, IRD, Montpellier. URL : <http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239> [in French]
- [90] Jah, M. K. and R. C. Paudel, 2010, « Erosion Predictions by Empirical Models in a Mountainous Watershed », *Journal of Spatial Hydrology*, vol. 10, n° 1, 14 p.
- [91] Jamin Jean-Yves, Windmeijer P.N. 1995. La caractérisation des agroécosystèmes de bas-fonds : un outil pour leur mise en valeur durable. Bouaké : Consortium Bas-Fonds, 325 p. ISBN 92-9113-132-6 Atelier annuel du consortium bas-fonds ADRAO. 1, Bouaké, Côte d'Ivoire, 6 Novembre 1995/10 Novembre 1995.
- [92] Jeon, J.-H., Park, C.-G., & Engel, B. (2014). Comparison of Performance between Genetic Algorithm and SCE-UA for Calibration of SCS-CN Surface Runoff Simulation. *Water*, 6(11), 3433–3456. doi:10.3390/w6113433 [CrossRef]
- [93] Kan, G., Liang, K., Li, J., Ding, L., He, X., Hu, Y., & Amo-Boateng, M. (2016). Accelerating the SCE-UA Global Optimization Method Based on Multi-Core CPU and Many-Core GPU. *Advances in Meteorology*, 2016, 1–10. doi:10.1155/2016/8483728 [CrossRef]
- [94] Kendall, S.M. and Stuart, A. (1943): *The advanced theory of statistics*. London: Charles Griffin, 1943; 7239.
- [95] Khodja H., Lubès-Niel H., Sabatier R., Masson J.-M., Servat E., Paturel J.-E., (1998) : Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest, Recherche d'une rupture en moyenne, Une alternative intéressante : les tests de permutations, *Revue de statistique appliquée*, tome 46, n°1, pp 95-110.
- [96] Khoualdia W., Djeddar Y. et Hammar Y. (2014) : Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de la Medjerda (Nord-est algérien). *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 29 : 6-23 (2014).
- [97] Killian J., et Teisser J., 1973. Méthode d'investigation pour l'analyse et le classement des bas-fonds dans quelques régions de l'Afrique de l'Ouest Proposition de classification d'aptitude des terres à la riziculture. *Agro. Trop.* pp 156-172
- [98] Konaté L., (1997) : Les bas-fonds dans le réseau hydrographique du fleuve Gambie : (Cartographie, Régimes hydrologiques, valorisation agricole et typologie). Doctorat de 3^{ème} cycle de Géographie, UCAD-ORSTOM, 207 pages.
- [99] Kouassi, A. M., Kouamé, K. F., Koffi, Y. B., Dje, K. B., Paturel, J. E., & Oulare, S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeog.* doi:10.4000/cybergeog.23388
- [100] La Barbera, P. et Rosso, R., 1989., On the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research*, 25: 735-741.
- [101] Lazzari M., Gioia D., Piccarreta M., Danese M., Lanorte A. (2015). Sediment yield and erosion rate estimation in the mountain catchments of the Camastra artificial reservoir (Southern Italy): a comparison between different empirical methods. *Catena*, 127 (April 2015), pp. 323-339
- [102] Le Barbé L., Lebel T. et Tapsoba D. (2002) - Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90. *Journal of Climate*, vol. 15, p. 187-202.

- [103] Le Borgne J. (1988) : La pluviométrie au Sénégal et en Gambie ORSTOM, Ministère français de la Coopération, Dakar, 278 p., Thèse de 3ème cycle.
- [104] Lebel, T., & Ali, A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology*, 375(1-2), 52–64. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030 [CrossRef]
- [105] Lee A. F. S., et Heghinian S. A., (1977): A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables, A Bayesian approach, *Technometrics* vol. 19, n° 4, p. 503-506.
- [106] Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. doi:10.1029/1998wr900018 [CrossRef]
- [107] Lérique J., 1975. Les transports solides en suspension de la Gambie aux stations de Kédougou et de Gouloumbou. Résultats de la campagne 1974. Rapport ORSTOM, Dakar, multigr., 11p. [In French]
- [108] Leroux M., (1983) : Le climat de l'Afrique tropicale, Th, doctorat d'Etat, Ed. Slatkine Champion, 633 pages.
- [109] Liu, J. S. (2001). *Monte Carlo Strategies in Scientific Computing*. Springer Verlag, New-York, 343p.
- [110] Liu T. 1992. Fractal structure and properties of stream networks. *Water Resources Research* , 28(11): 2981–2988.
- [111] Liu, Y. (2009). Automatic calibration of a rainfall–runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36(5), 9533–9538. doi:10.1016/j.eswa.2008.10.086 [CrossRef]
- [112] Lubes-Niel, H., Masson, J. M., Paturel, J. E. & Servat, E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 11 (3), 383–408. <https://doi.org/10.7202/705313ar>
- [113] Lujano Laura, E., Sosa Sarmiento, J. D., Lujano Laura, A., & Lujano Laura, R. (2016). Modelación hidrológica semidistribuida en la región hidrográfica del Titicaca: caso de estudio cuenca del río Ramis, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 18(4), 431. doi:10.18271/ria.2016.235 [CrossRef] [In Spanish]
- [114] Mahé G., (1993) : Les Écoulements Fluviaux sur la Façade Atlantique de l’Afrique : Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes, Editions de l’ORSTOM, Collection Études et Thèses Paris 1993 ; 438 pages.
- [115] Maignien R. (1965) : Notice explicative Carte Pédologique du Sénégal au 1/1.000.000 ; ORSTOM, 71 pages.
- [116] Mandelbrot B. B. (1982). *The fractal geometry of nature*, Ed. Freeman and Co, 280 p.
- [117] Mandelbrot, B. B. (1989). Multifractal measures, especially for the geophysicist. *Pure and Applied Geophysics*, 131(1/2):5-42.
- [118] Mandelbrot B. (1995). *Les Objets fractals*. Paris : Flammarion, 212 p.

- [119] Manga A.V., (2012): Variabilité pluviométrique et estimation des écoulements dans le bassin versant du Sine-Saloum (Sénégal). Mémoire de Master 2 ; 97 pages, 5 cartes, 24 figures et 14 tableaux.
- [120] Mann, H.B. and Whitney D. R. (1947): On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann. Math. Statist.*, 18 : pp. 50-60.
- [121] Mantilla R., Gupta V.K. et Mesa O.J. – 2006: Role of coupled dynamics and real network structures on Hortonian scaling of peak flows. *Journal of Hydrology* XX, 1-13. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2005.03.022
- [122] Marega O. (2016), Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahélienne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger) », thèse de doctorat, Université Diderot-Paris 7, 700 p. [In French]
- [123] Martin A. (1962) : Etude hydrogéologique de la région de Kédougou – Bakel (Sénégal oriental – campagne 1962 / BRGM.
- [124] Mati, B. M., Morgan R. P. C., Gichuki F. N., Quinton J. N., Brewer T. R. and Liniger H. P., 2000, « Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya » *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 2, n°. 2, pp. 78-86.
- [125] Mbaye, M. L., Haensler, A., Hagemann, S., Gaye, A. T., Moseley, C., & Afouda, A. (2015). Impact of statistical bias correction on the projected climate change signals of the regional climate model REMO over the Senegal River Basin. *International Journal of Climatology*, 36(4), 2035–2049. doi:10.1002/joc.4478 [CrossRef]
- [126] Mbaye, M. L., Diatta, S., & Gaye, A. T. (2018). Climate Change Signals Over Senegal River Basin Using Regional Climate Models of the CORDEX Africa Simulations. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 123–132. doi:10.1007/978-3-319-98878-8_12 [CrossRef]
- [127] McCool D, Brown L, Foster G, Mutchler C. and Meyer L (1987). « Revised Slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation ». *Trans. Am. Soc. Ag. Eng.* 30 p. 1387-1396.
- [128] McGuinness, J.L. and Bordne, E.F. (1972). A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. *Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.*, 71 pp
- [129] Menabde M., Veitzer S., Gupta V.K. et Sivapalan M. – 2001: Test of peak flow scaling in simulated self-similar river networks”, *Advances in Water Resources*, vol. 24, 991-999. DOI : 10.1016/S0309-1708(01)00043-4
- [130] Mendy A. (2010) : Ressources en eau des bassins versants de la Néma et de Madina Djikoye, Perceptions, caractérisation de la vulnérabilité et perspectives de gestion durable, Thèse de doctorat de 3ème cycle, UCAD, Département de Géographie, 333 pages
- [131] Meylan P. et Musy A., (1999) : Hydrologie fréquentielle, HGA Bucarest, 414 pages.
- [132] Michel P. (1973) : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Etude géomorphologique ; Tome 1, Mémoire ORSTOM-Paris, 810 pages.
- [133] Mohanty P.K., Panigrahi D. and Acharya M. (2014) MissRF: A Visual Basic Application

- in MS Excel to find out Missing Rainfall Data and Related Analysis. *Intelligent Information Management*, 6, 38-44. <http://dx.doi.org/10.4236/iim.2014.64006>.
- [134] Morgan R.P.C (2005). *Soil erosion conservation*. Third edition. Victoria: Blackwell Publishing
- [135] Morin H. (1993) : *Théorie de l'échantillonnage*, Les presses de l'Université Laval.
- [136] Morschel J. and Fox D. A method of mapping erosive risk: Application to the hills of Terrefort, Lauragais. M@ppemonde 76(2004,4) <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.html>.
- [137] Musy A, et Meylan P. (1987) : *Modélisation d'un processus non stationnaire. Application à la pluviométrie en zone semi-aride*. I.A.H.S. Publ. n° 168, 1987 – pp 287-299
- [138] Musy A, Higy C. (2004) : *Hydrologie une science de la nature*. Collection gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes, 314 p.
- [139] Muttill, N., & Liong, S.-Y. (2004). ARE COMPLEXES IN SCE-UA NECESSARY? *Hydroinformatics*, 874–881. doi:10.1142/9789812702838_0108 [CrossRef]
- [140] Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308–313. doi:10.1093/comjnl/7.4.308 [CrossRef]
- [141] Oliveira JR, R. C., and Medina, B. F. 1990. The erosivity of rainfall in Manaus (AM). *Rev. Bras. Solo* 14, 235–239.
- [142] Oudin L., (2004) : *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 495 pages.
- [143] Paeth, H., & Hense, A. (2004). SST versus Climate Change Signals in West African Rainfall: 20th-Century Variations and Future Projections. *Climatic Change*, 65(1/2), 179–208. doi:10.1023/b:clim.0000037508.88115.8a [CrossRef]
- [144] Panthou, G.; Vischel, T.; Lebel, T. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *Int. J. Clim.* 2014. [CrossRef]
- [145] Paturel J.E., Servat E., Delattre M.O., et Lube-Niel H., (1998) : *Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique*, *Hydrological Sciences, Journal des Sciences Hydrologiques*, 43 (6) Décembre 1998, pp 937-946.
- [146] Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275–289. doi:10.1016/s0022-1694(03)00225-7 [CrossRef]
- [147] Pettit A. N., (1979): A non-parametric approach to the change-point problem, *Applied Statistics*, t. 28, n°2, pp. 126-135.
- [148] Phuong T.T., Shrestha R.P., and Yoshiki Y., 2012. The impacts of land use change on soil erosion in bo river watershed, central Vietnam. *International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences 2012*
- [149] Planchon O., Fritsch E., & Valentin C. (1987). Rill development in a wet savannah environment. *Catena*, (suppl. au N° 8), 55-70. ISSN 0341-8162. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_18-

[19/25142.pdf](#)

- [150] Pulido-Velazquez, D., Sahuquillo, A., Andreu, J., & Pulido-Velazquez, M. (2007). An efficient conceptual model to simulate surface water body-aquifer interaction in conjunctive use management models. *Water Resources Research*, 43(7). doi:10.1029/2006wr005064 [CrossRef]
- [151] Raunet M. (1982) : Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar Formation, caractères morphopédologiques, hydrologie, aptitudes agricoles IRAT, service de pédologie, Montpellier.
- [152] Raunet M. (1984) : Les potentialités agricoles des bas-fonds en régions intertropicales : l'exemple de la culture du blé de contre-saison à Madagascar, in *L'Agronomie Tropicale*, 1984, 39,2, pp. 121-135.
- [153] Raunet, M. (1985) : Bas-fonds et riziculture en Afrique ; approche structurale et comparative *L'Agronomie Tropicale*, 40 (3) : 181-201
- [154] Renard K. G and Foster G. R., 1983. Soil Conservation: Principles of erosion by water. In H. E Dregne and W. O Willis, eds. *Dryland Agriculture* pp. 155-176. *Agronomy Monogr.* 23, Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., and Soil sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin.
- [155] Renard, K. G. and Freimund, J. R. 1994. Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R factor in the Revised USLE. *J. Hydrol.* 157: 287–306.
- [156] Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., and Yoder D. C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agricultural Handbook No. 703*, US Department of Agriculture, Washington DC.
- [157] Roche M., (1963) : *Hydrologie de surface*, ORSTOM et GAUTHIER - VILLARS ÉDITEUR – PARIS 1963, 429 pages.
- [158] Rochette C. -1974- *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal*. Coll. Mém. ORSTOM, 1, 442 p.
- [159] Rodriguez-Iturbe I. et Rinaldo A., (1997), *Fractal river basins*, Cambridge University Press
- [160] Roose, E., 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agronomie Tropicale*, 1967, 22 (2), p. 123-152. ISSN 0151-1238. [In French]
- [161] Roose, E., 1977, « Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa », *Soil Conservation Society of America*, Ankeny, Iowa, pp. 50-71.
- [162] Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome : FAO, 1994, 438 p. (*Bulletin Pédologique de la FAO* ; 70). ISBN 92-5-203451-X. [In French]
- [163] Rosenbrock, H. H. (1960). An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. *The Computer Journal*, 3(3), 175–184. doi:10.1093/comjnl/3.3.175 [CrossRef]
- [164] Roudier, P., Ducharne, A., & Feyen, L. (2014). Climate change impacts on runoff in West Africa: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7), 2789–2801. doi:10.5194/hess-18-2789-2014 [CrossRef]

- [165] Sagna P., (2007) : Sénégal, Caractéristiques climatiques, Atlas de l'Afrique, Sénégal, Paris, Editions J. A., pp 66-69
- [166] Sambou, S., Dacosta, H., & Paturel, J.-E. (2018). Variabilité spatio-temporelle des pluies de 1932 à 2014 dans le bassin versant du fleuve Kayanga/Gêba (République de Guinée, Sénégal, Guinée-Bissau). *Physio-Géo*, (Volume 12), 61–78. doi:10.4000/physio-geo.5798
- [167] SARR B. et LONA I. (2009) - Les fortes pluies enregistrées au Sahel au cours de l'hivernage 2007 : variabilité et/ou changement climatique. *Actes du 14^{ème} Colloque International SIFÉE "Changements climatiques et évaluation environnementale : outils et enjeux pour l'évaluation des impacts et l'élaboration des plans d'adaptation"* (Niamey, Niger), 9 p.
- [168] Sarr J., (2007) : Les bas-fonds du bassin versant du Tararé (Bassin arachidier Centre-ouest) : Cartographie – Potentialité – stratégies spatiales pour un développement durable ; Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle de Géographie, UCAD, 331pages, 38 cartes, 18 photos, 39 figures et 29 tableaux.
- [169] Schönbrodt, S., Saumer, P., Behrens, T., Seeber, C., & Scholten, T. (2010). Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China. *Journal of Earth Science*, 21(6), 835–845. doi:10.1007/s12583-010-0135-8
- [170] Schroeder M. (1991), *Fractals, Chaos, Power laws*, Ed. Freeman and Company.
- [171] Schumm, S.A. (1956). Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67, 597-646. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:eodsas\]2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:eodsas]2.0.co;2)
- [172] Schumm, S.A., Dumont, J.F & Holbrook, J.F., 2000. Active tectonics and alluvial rivers. Cambridge University Press, Cambridge, 276 p.
- [173] Servat E., Paturel J.E, Lube-Niel H., Kouamé B., Travaglio M. et Marieu B., (1999) : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non Sahélienne ; *Revue des Sciences de l'eau/ Journal of water Science*, Vol, 12, n°2, pp. 363-387. <http://id.erudit.org/iderudit/705356ar>.
- [174] Setegn, S. G., Rayner, D., Melesse, A. M., Dargahi, B., & Srinivasan, R. (2011). Impact of climate change on the hydroclimatology of Lake Tana Basin, Ethiopia. *Water Resources Research*, 47(4). doi:10.1029/2010wr009248 [CrossRef]
- [175] Shinde V., Tiwari K.N., and Singh M., (2010). Prioritization of micro watersheds on the basis of soil erosion hazard using remote sensing and geographic information system. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2 (3) (2010), pp. 130-136.
- [176] Séguis, L., Albergel, J., & Bader, J. C. (1993). Construction de la courbe de remplissage d'un réservoir par bilan hydrologique et applications.
- [177] Sinaré Y., Daurensan N., et Cudennec C., (1993) : Interrelation entre agriculture et hydrologie en zone de bas-fond. Exemple du bassin versant de Kangura, Burkina Faso. In *relations terre eau dans les bassins versants ruraux*. Atelier électronique 18 septembre-27octobre 2000. Etude de cas 2. ONU/FAO, 4 p.
- [178] Sorooshian, S., Duan, Q., & Gupta, V. K. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model.

- Water Resources Research, 29(4), 1185–1194. doi:10.1029/92wr02617 [CrossRef]
- [179] Sow A.A., (2006) : L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé. Thèse de doctorat d'Etat ès Lettres et sciences humaines, département de géographie, UCAD, 1232 pages, 457 figures, 661 tableaux et annexes.
- [180] Stanzel, P., Kling, H., & Bauer, H. (2018). Climate change impact on West African rivers under an ensemble of CORDEX climate projections. *Climate Services*, 11, 36–48. doi:10.1016/j.cliser.2018.05.003 [CrossRef]
- [181] Stone, R. P. and Hillborn D., 2000, Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada, Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA),
- [182] Strahler A.N (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans Am Geophys Union* 38:913–920.
- [183] Thiaw I. (2015) : Variabilité pluviométrique et apports en eau dans le bassin versant du Diarha au pont routier (affluent de rive gauche du fleuve Gambie) Mémoire de master 2 ; Département de géographie (UCAD) 142 p.
- [184] Thiaw I. (2017). Rainfall Variability and Water Supplies in the Diarha Watershed (Tributary of Gambia River). *Hydrology*. Vol. 5, No. 4, 2017, pp. 41-57. doi: 10.11648/j.hyd.20170504.11
- [185] Thiaw, I. and Dacosta H. (2017). Mapping of Soil Erosion Risk in the Diarha Watershed Using Rusle, RS and GIS. *American Journal of Remote Sensing*, 5(4), 30. doi:10.11648/j.ajrs.20170504.11[CrossRef]
- [186] Thiaw I. Dacosta H, Mendy A. and Sow A. A. (2017); Topographic Characterization And Mapping Of Soil Erosion In The Diarha Watershed Using Rusle, Rs And Gis. *Int. J. of Adv. Res.* 5 (12). 656-675] (ISSN 2320-5407). http://www.journalijar.com/uploads/896_IJAR-21135.pdf
- [187] Thioubou A. (1995) : Fonctionnement, perceptions et dynamique des écosystèmes de bas-fond en Pays Bassari. Mémoire de maîtrise ; UGB, UER de Lettres et Sciences Humaines-Section Géographie ; 111p, 31 Tableaux, 23 Figures et 9 Cartes.
- [188] Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agro.* 12: 13-49, INRA
- [189] Vauchel P., (2004) : Hydraccess : Logiciel d'importation, de stockage et de traitement de bases de données, IRD.
- [190] Vigau N., Vrac M. and Y. Caballero (2013). Probabilistic downscaling of GCM scenarios over southern India. *Int. J. Climatol.* 33: 1248-1263.
- [191] Vrac M, and Friederichs P. (2015). Multivariate-Intervariable, Spatial, and Temporal-Bias Correction. *J. Climate*, 28: 218-237, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00059.1
- [192] Vrac, M., T. Noël, and R. Vautard (2016). Bias correction of precipitation through Singularity Stochastic Removal: Because occurrences matter. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121: 5237–5258, doi:[10.1002/2015JD024511](https://doi.org/10.1002/2015JD024511)
- [193] Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bastidas, L. A., Bouten, W., & Sorooshian, S. (2003). Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research*, 39(8). doi:10.1029/2002wr001746 [CrossRef]

- [194] Vrugt, J. A., Clark, M. P., Diks, C. G. H., Duan, Q., & Robinson, B. A. (2006). Multi-objective calibration of forecast ensembles using Bayesian model averaging. *Geophysical Research Letters*, 33(19). doi:10.1029/2006gl027126 [CrossRef]
- [195] Wischmeier W. H. and Smith D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses – a guide for conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, Washington.
- [196] Wu, H., Hayes, M.J., Wilhite, D.A. et Svoboda, M.D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology*, 25: 505– 520.
- [197] Xu.C-Y. (2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimètre measurement data in Germany *Hydrological Processes* N°19: 3717–3734
- [198] Zeppenfeldt T., Vlaar J.C. J (1990). Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest: synthèse préliminaire de l'état des connaissances. CIEH/UAW, Ouagadougou.
- [199] Zhu, X., Wu, J., & Wu, J. (2006). Application of SCE-UA to Optimize the Management Model of Groundwater Resources in Deep Aquifers of the Yangtze Delta. *First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS'06)*. doi:10.1109/imscs.2006.192 [CrossRef]

Annexes

Tableau. Lames d'eau précipitées annuelles du bassin du Diarha (1921-2016)

Date	Moy.Arith.	Thiessen	1/Distance^2	Krigeage
1921	1242.5	1150	1145	1119.4
1922	1325.1	1171.4	1191.2	1167.9
1923	895.6	710.9	773.9	757.2
1924	860.8	689.1	746.5	724.2
1925	1588.9	1468.8	1467.5	1424
1926	1563	1389.9	1407.4	1364.6
1927	1235.2	1027	1083.6	1063.9
1928	1536.1	1406.4	1407.2	1362.9
1929	1489.5	1259.4	1305.9	1292.4
1930	1282.1	1073.7	1117.3	1114.3
1931	1132.3	980.1	1001.6	995.5
1932	1421.7	1304.1	1301.2	1284.8
1933	1483.2	1257.1	1304	1300.7
1934	1255.2	1078.5	1114.3	1095.6
1935	1366.6	1200.8	1224.4	1203
1936	1428.1	1249	1274.8	1257.6
1937	1515.4	1349.6	1367.8	1345
1938	1465.2	1296.3	1318.7	1289
1939	1214.1	1017.1	1061.4	1044.6
1940	1208.7	976.2	1039.7	1046.6
1941	1193.9	973.9	1027.5	1034.2
1942	1169	1020.3	1047.1	1036
1943	1277	1087.4	1124	1115.3
1944	1237.3	1123.5	1126.1	1100.1
1945	1303.7	1111.9	1147.8	1143.7
1946	1128.3	948.7	987.9	984
1947	1192.5	1057.2	1074.7	1057.7
1948	1267.3	1228.1	1204.2	1198.2
1949	1286.4	1448.8	1342.8	1340.5
1950	1414.6	1388	1358.8	1353.5
1951	1726.5	2070.5	1876.5	1924.2
1952	1405	1141.6	1199.1	1160.7
1953	1345.5	1064.8	1141	1087.4
1954	1517.9	1164.5	1260.8	1217.1
1955	1395.1	1177.7	1217.8	1220
1956	1289.8	982.2	1063.9	1033.5
1957	1483.3	1056	1181.8	1147.3
1958	1423.7	1199.5	1244	1239
1959	1221.5	918.4	1000.7	975.4
1960	1183.3	1020.3	1051	1037.3
1961	1469.6	1324	1337.4	1316.3
1962	1488.8	1412.2	1392.1	1375.1
1963	1325.9	1038.6	1113.5	1074.4
1964	1381.5	1252.9	1259.3	1250.7
1965	1633	2430.7	2062	2129.1
1966	1554	1673	1560.3	1557.8

Annexes

1967	1309.8	1254.2	1220.3	1224.6
1968	1115.2	779.4	865.7	825.8
1969	1240.3	1012.1	1069	1049
1970	1176.2	1082.4	1078.1	1063.8
1971	1095.9	1042	1031.2	1038.4
1972	1134.8	949.1	973.2	947.8
1973	1214.5	1021	1073.1	1039.7
1974	1329.3	1309.4	1293.7	1288.8
1975	1271.8	995.7	1082.7	1034.1
1976	1193.5	868	940.4	896.3
1977	1063.4	878.6	913.5	876.3
1978	1375.5	1077.9	1194.5	1181.6
1979	1083.1	924.8	955.3	925.5
1980	1175.2	900.2	973.8	934
1981	1151.2	994.7	1005.1	996.4
1982	1074.9	1076.1	1051.5	1058.9
1983	968.3	766.2	804.6	767.3
1984	1028.8	621.5	749.1	692.3
1985	1218.2	1128.4	1128.4	1126.6
1986	1118.3	1043.9	1038	1037.4
1987	1078.3	1039.7	1019.3	1015.4
1988	1111.8	1001.6	1017.5	997.1
1989	1198	1067	1082.5	1077.8
1990	1098.8	1007.9	1000.1	984.1
1991	1126.1	1028.7	1024.9	1018.1
1992	1105	932.5	963.8	932.8
1993	1177.2	848.8	977.9	935.5
1994	1373.7	1114	1174.6	1157.1
1995	1173.9	1025	1040.4	1023.9
1996	1243.2	1105.3	1127.3	1107.6
1997	1337.2	831.1	987.1	924.1
1998	1182.5	934.1	1015.5	986.8
1999	1342.3	1250.9	1262	1251.1
2000	1221.1	887.2	975.7	928.6
2001	1147.7	778.2	876.8	826.5
2002	1145.5	878.6	991.7	960.1
2003	1426.6	1126.6	1224.5	1203.7
2004	1246.3	1083	1113	1090.6
2005	1218.9	1043.1	1074	1054.7
2006	1069.5	944.4	981	976
2007	1071.5	1069.7	1047.3	1060.5
2008	1142.8	938	993	982.8
2009	1264.4	1120.9	1152.9	1135.5
2010	1399.6	1114.9	1192.5	1157.8
2011	1185	975.4	1026.4	993.6
2012	1244.6	1195	1192.9	1197.7
2013	1327.1	1190.4	1196.8	1177.6
2014	1127.1	1066.9	1040.6	1017.5
2015	1456.4	1257.6	1304.7	1345.2
2016	1249.5	1088.6	1123.3	1163.9

Tableau. Lame d'eau précipitée mensuelle du bassin du Diarha (1921-2016)

Date	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1921	0	0	0	2	8.4	166.6	175.9	304.6	341.2	115.2	6.6	0
1922	0	0	0	0.1	3.3	120.2	206.7	358.7	333.2	100.7	44.3	2.7
1923	0	0	0.8	2.9	61	105.7	138.9	182.5	214.4	45.7	10.4	0
1924	4.3	0	0.9	4.6	28.6	91	169.5	168.2	127.6	112.7	21.8	0
1925	0	0	19.5	0.8	62.8	231.8	233.2	360	394	100.5	24.4	0
1926	0	0	0	6.8	102.8	214.7	275.5	227.4	282.5	193.6	63.4	0.6
1927	0	0	0	8.5	73.5	79.3	203.7	306.6	242.7	150	3.6	0.3
1928	0	0	0	10.1	86	214.1	209.2	302.8	300.6	239.3	3.3	0
1929	0	0	0.1	20.1	91	211.3	231	311.6	336.8	91.5	0.8	0
1930	0	0.9	0.8	21.6	74.5	148.3	238.6	244.2	283.1	102.5	0.6	0.2
1931	1.7	2.8	36.7	21.7	61	144.9	226.5	183.8	188.4	81.7	12.1	34.5
1932	9	4.1	0	29.5	80.8	183.4	282.7	326.8	225.6	80.9	56.7	5.6
1933	0	1.8	0	7.6	76	204.9	323.2	253.6	279.6	96.5	46.6	12.6
1934	0	0	0	3.3	30.3	197.7	214.9	273.7	256.7	108.3	13.1	0.1
1935	1.6	0	4.9	16.1	79.6	170.8	320.7	271.9	216.4	104.1	18.8	0
1936	0	4.4	0.6	26.6	119.7	139.4	283	325.3	219.8	92.8	35.3	12.2
1937	0.6	3.8	5.9	36.8	57.8	187.8	266.3	308.3	319.8	157.3	2.3	0
1938	0	0	18.2	2.2	118.1	188.3	208.7	336.6	293.6	115.8	10.1	0
1939	0	0	0	0.5	71.6	137.5	189.6	255.6	233.9	141.9	11.7	4.7
1940	0	0	0	17.8	74.3	184.9	188.9	255.8	217.2	103.3	6.3	0.1
1941	4.6	0	1.8	2.5	79.6	125.7	216.7	284.9	206	113.1	0.4	0
1942	0	0.6	0	24.2	54.2	106.3	171.3	294	247.1	104.6	23.6	12
1943	0.1	0	0.7	43.1	31.8	188.8	169.6	283.3	252.6	114.9	31.3	0.5
1944	0	0	0	41.9	51.7	152.9	273.7	299.8	160.4	103.8	17	0
1945	0	0	0.2	17.3	33.8	116.3	206.7	324	259.3	179.1	8	0
1946	0	0	0.2	4.7	60.6	144	184.9	295.7	220	58.3	17.2	0
1947	0	0.7	0	11.2	24.6	180.7	183.9	340.5	253.8	55.4	4.6	4
1948	0	1.8	0	12	49.2	272.6	262	351.7	189.1	50.2	8.5	2.5
1949	0.1	0	5.6	2.3	29.3	255.3	265.7	394.2	311.5	45.9	1.4	30.5
1950	0	0	0.2	1.9	27.7	195.7	273.3	443.6	288.6	120.5	3.3	1.1
1951	0.9	0	1.3	14.2	82.9	222.4	352.5	473	415.8	351.1	10.4	0.5
1952	0	0.1	0.2	0.7	77.3	160	346.1	160.4	298.2	116.9	0.8	0.2
1953	0.4	0.1	0.5	2.9	55.7	141.8	270.9	251	238.8	108.5	18.6	3.6
1954	0	2.2	0.4	4	67	216.6	310.2	339	201.1	56	22.6	0.1
1955	0	0.2	2.5	26.5	50.5	131.6	201.5	489.8	203	105.5	5.3	4.1
1956	1	1.4	0	4.5	33.8	176.9	200.3	248	232.3	128.1	5.8	4
1957	0.7	0.1	0	4.2	10.1	193.6	202.2	288.6	337.6	108.5	3.9	0
1958	0.4	0.3	1.4	15.1	68	173.8	202.4	393.8	271.4	62.9	49.7	0.9
1959	0.1	0.1	0.4	1.9	70.3	68.2	164.5	359.7	241	53.2	17.7	0
1960	0.1	0.1	0.2	1	61.2	111.2	182.5	306.9	285.5	72.9	17.4	0.2
1961	0.1	0.1	0.1	4.9	63.4	168.9	260	438.7	312.6	55	14.4	0.1
1962	0	0	0	2.5	70.8	134.2	286.2	465.4	359.1	51.2	7.2	0
1963	1.1	0	0	0.2	33.6	189.5	210.3	274.3	189.9	168.1	9.4	0

Annexes

1964	0.1	0	0	3.3	74.1	198.5	254.2	315.1	298	105.4	3.2	0.7
1965	1.3	0	0	0.8	38.5	121.6	312.5	564	769.3	305.9	17.4	0
1966	0.1	0	9.5	71.2	155.3	222.9	255.5	224.6	389.7	226.1	2.1	0.3
1967	0.1	0.6	2.8	26	66.3	122.9	224.9	297.5	376.9	105.5	1.2	0
1968	0	3.5	0	5.3	33.8	69.8	210	244.1	184	71.2	5	0.9
1969	0.3	0.1	2.1	1.9	76.8	111.8	308.2	246	198.8	102.7	1.6	0
1970	0	0	0.1	1.3	56.9	124.7	285.9	376.4	185.5	33	1.6	0
1971	0	0.1	0	21.3	10.3	166.9	175.6	356.1	276.9	31	1.1	0
1972	0	0	0.2	1.1	41.9	107.8	267.9	248.8	190	79.2	10.9	1.3
1973	0	0	0	1.6	76.2	145.5	213.1	369.7	185.4	50.1	0.4	0
1974	0	0	0	3.2	58.9	156.6	299.9	447.8	272.5	45	6.5	0
1975	0	0	0	5.3	18.7	111.3	238.2	227.5	401.4	32.7	0.3	0
1976	0.1	0.5	0.8	5.9	40.9	112.8	227.7	224.9	179.5	78.4	25.5	0.3
1977	0.2	0	0.3	6.1	31.8	89	203.3	176.4	289.7	83.8	0.1	0.1
1978	0	0.6	0.1	1.7	25.9	149.5	249.6	341.3	251.2	151.3	4.5	7
1979	0.2	0.1	2.1	3.6	38.3	203.6	200.6	256.7	138.4	79.5	4	0.1
1980	0	0.8	0	0.1	8	135.2	227.4	348.9	198.6	11.6	5.8	0
1981	0	0.3	1.7	11.2	83.9	91.8	217.8	346.3	222.7	21	0.8	0
1982	0	0	0.8	2.7	19.5	170.8	232.4	322.5	204.3	106.4	0.1	0
1983	0	0.9	0.2	0.6	24.4	165.8	202.9	193.7	141.9	37.9	1.3	0
1984	0	0	0	0.6	24.9	34.2	246.5	195.5	160.6	30.6	2.2	0
1985	0	0	0.3	9.8	11.3	204.9	253.6	321.5	292.3	33.6	0.7	0
1986	0	0.7	0.1	1.9	93	102.1	182.7	245.6	333.8	77	1.8	0
1987	0	0	0	0.8	47.4	125.5	200.8	247.8	278.4	115.7	0.4	0
1988	0	0	0	6.9	35.1	124.4	240.6	272.1	243.7	55.1	17.4	0
1989	0	1.8	5.2	1.8	51.7	162	220.1	318.3	233.3	77.4	5.2	0
1990	0	0.2	1.7	8.5	43.8	114	265.6	272.3	190.7	86.1	3.7	0
1991	0	0	0.2	2.2	15.9	107.6	289.2	228.6	304.3	67.8	2	1.1
1992	0.2	0.1	0.1	0.5	50.5	175.6	226.7	155	260.3	67.7	0.7	0.5
1993	0.3	0	0.3	0.7	21.7	157.7	188.9	202	301.3	64.4	1.5	0
1994	0	0	0.5	1.1	38.5	147.1	249.6	288.1	299.2	126.3	4.5	0
1995	0	0	1.2	1.2	21.4	104.1	234.3	425.2	211.4	26.4	0	0.4
1996	0.2	0.5	0.1	0	78.3	157.2	218.2	340.5	261.5	55.2	0	0.1
1997	0	0	0.1	2.3	97.8	171	120.7	342.6	139.4	50.2	1.7	0
1998	0	0	0.4	1.3	21.9	116.3	136.9	360.6	280.8	71.4	0.1	0
1999	0.1	0	0	3.9	55.3	175.8	231.6	390.5	236.2	155	2.5	0
2000	0.1	0	0.2	7.1	15.8	121.8	246	260.6	140.6	135.5	2.2	0
2001	0	0	0	0.8	46.3	155.1	209.7	176.8	189.3	47.3	0.9	0
2002	0.1	0	0.1	0.1	28.1	141.6	224.2	296.6	220.8	54.8	0	0.1
2003	0.1	0	0	5.8	19.4	206.5	221.3	432.6	261.2	51.2	3.2	0
2004	0	0	1	12.7	45.7	150.6	260.5	346.3	227.8	41.7	4.1	0
2005	0	6.6	15.9	0	84.5	154.9	231	293.4	183.7	76.9	8.7	0
2006	0.2	1.1	0	1.7	70.9	165.4	244.1	172.7	251.5	67.2	0	0
2007	0	0.1	0	0.1	33.4	131	242.8	333.8	282	42.3	0.3	0.1
2008	0	0	0	0.2	57.6	130	217.2	337.3	164.3	76.8	0	0
2009	0	0	0	0.1	57.6	160.7	181.8	310.2	367.8	57	0	0
2010	0	0	0	6.5	58	105.5	195.3	281.4	355.6	156.3	0.3	0

2011	0	0	0	0.2	17.7	175.7	226.7	342.1	171.1	61.1	0.5	0
2012	0	0	0	0.1	73.9	160.1	200.5	219.2	379.7	106.1	59.6	0
2013	0	0	0	0.1	34.7	144.6	201.5	357.8	343.3	91.4	5.6	0
2014	0	0	0	0	110.6	116.2	133.2	298.5	280.5	78.8	0	0
2015	0	0	0.1	0	67	111.5	197	457.1	371.7	145.5	0	0
2016	2	0	0	66.2	40.3	89.8	254	261.2	357.5	86.8	8.7	0

Photo. Une menace écologique bien réelle



Source : Enquête de terrain (THIAW, Décembre 2019)

VALORISATION DES RESSOURCES EN EAU DES BAS-FONDS DU BASSIN VERSANT DE DIARHA

IDENTITE DE L'EXPLOITANT

NOM

NIVEAU D'INSTRUCTION

PRENOM

LOCALITE

SEXE

ETHNIE

☐ Peul	☐ Malinké
☐ Diakhanké	☐ Bassari
☐ Bédike	☐ Badiaranké
☐ Serer	☐ Wolof
☐ Autre	

AGE

EXPLOITATION DES BAS-FONDS

Menez-vous des activités dans les bas-fonds?

- ☐
- OUI
- ☐
- NON

Si OUI lesquelles?

☐ Agriculture	☐ Elevage
☐ Pêche	☐ Commerce
☐ Autres	

Si 'Autre', Précisez

Quels sont les types de cultures pratiqués dans les bas-fonds?

- ☐
- Saison
- ☐
- Contre saison

Précisez les types de cultures

☐ Riz :	☐ Arachide:
☐ Mais:	☐ Coton:
☐ Sorgho:	☐ Mil
☐ Tomate	☐ Pomme de Terre

Si 'Autre' précisez

Le calendrier cultural pour chaque spéculation?

Combien de parcelles mettez-vous en valeur?

☐ au moins une parcelle	☐ 2 parcelles
☐ 3 parcelles	☐ + de 3 parcelles

Qui sont les différents acteurs qui interviennent dans la mise en valeur?

☐ Homme	☐ Femme
☐ Enfant	☐ ONG
☐ Autre	

Si 'Autre', précisez :

Ceux qui travaillent dans les bas-fons sont-ils encadrés?

- ☐
- OUI
- ☐
- NON

Si OUI, par qui?

Reçoivent-ils des soutiens financiers ou matériels?

- ☐
- Oui
- ☐
- Non

Si 'OUI' de qui?

☐ Mairie	☐ ONG
☐ Prêt bancaire	☐ Autre

Si 'Autre', précisez :

Superficie exploitée

☐ Moins d'un ha	☐ 1 à 2 ha
☐ 2 à 3 ha	☐ + 3 ha

Comment organisez-vous le travail?

☐ Individuel	☐ Famille
☐ Association	☐ Autre

VALORISATION DES RESSOURCES EN EAU DES BAS-FONDS DU BASSIN VERSANT DE DIARHA

Employez-vous de la main-d'oeuvre?

☐ Oui ☐ Non

Pour quelle durée ?

☐ Permanent ☐ Saisonnier

Si OUI quel est le mode de paiement?

L'ACCES A LA TERRE

Nom du bas-fond

Si 'Autre', précisez :

Distance par rapport au village

Y a-t-il des litiges fonciers?

☐ OUI ☐ NON

Quelles sont vos relations avec les éleveurs qui amènent ici leur bétail ?

Mode d'acquisition de la terre

☐ Héritage ☐ Don
☐ Location ☐ Prêt
☐ Autre

L'EAU DANS LES BAS-FONDS

Comment accédez-vous à l'eau?

☐ Puits ☐ Cours d'eau
☐ céanes ☐ Irrigation
☐ Autre

Utilisez-vous des produits chimiques pour l'entretien des plantes?

☐ OUI ☐ NON

Si 'Autre', précisez :

Si 'OUI' lesquels?

☐ Herbicide ☐ Insecticides
☐ MPK ☐ Urée

Quel est votre système d'arrosage?

☐ Motopompe ☐ Poulie
☐ Pompe manuelle ☐ Exhaure manuelle
☐ Autre

Utilisez-vous de l'engrais biologique?

☐ OUI ☐ NON

Si 'Autre', précisez :

Si 'OUI' donnez la nature

Quels sont les outils que vous utilisez pour le labour et l'arrosage des parcelles?

☐ Arrosoir ☐ Seau
☐ Charrue ☐ Pioche
☐ Binette ☐ Pelle
☐ Daba ☐ Râteau
☐ Houe ☐ autre

En quelle période de l'année les sources d'eau se tarissent?

Constatez-vous une réduction ou une augmentation de la quantité d'eau disponible?

☐ Oui ☐ Non

Si 'Autre', précisez :

Cela est due à quoi selon-vous?

LES CONTRAINTES DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES BAS-FONDS

Rencontrez-vous des contraintes dans la mise en valeur?

☐ OUI ☐ NON

Si 'OUI' lesquelles?

☐ Naturelles ☐ Humaines
☐ Economiques

VALORISATION DES RESSOURCES EN EAU DES BAS-FONDS DU BASSIN VERSANT DE DIARHA

Quelles sont vos solutions face à ces contraintes?

LE SYSTEME POST RECOLTE

A quoi est destinée la production?

☐ Vente ☐ Consommation

Où est ce que vous vendez vos produits?

☐ Dans le village ☐ Louma
☐ Marché urbain ☐ Autre

Si 'Autre', précisez :

Quels sont les marchés les plus fréquentés?

Quels sont les moyens que vous utilisez pour vous rendre aux marchés (Louma)?

☐ Charrette ☐ Voiture
☐ Vélo ☐ Moto

Si 'Autre', précisez :

conservation

produit

Prix de vente

le prix de vente du sac d'arachide?

A quelle période de l'année les prix sont-ils beaucoup plus élevés?

Les causes de ces fluctuations?

Comment sont les revenus?

☐ Faible ☐ Moyen
☐ Important

Pouvez-vous estimer les revenus obtenus par spéculation?

fin campagne

Table des matières

Sommaire-----	1
Avant-propos et remerciements-----	3
Résumé -----	5
Abstract-----	6
INTRODUCTION GÉNÉRALE -----	7
Objectifs de l'étude -----	10
Hypothèses de recherche-----	11
État de la question -----	12
Le concept de bas-fond -----	12
Classification des bas-fonds-----	14
MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE -----	18
Collecte des données -----	19
Travaux de terrain-----	19
Traitement de l'information -----	21
1. Délimitation du bassin versant du Diarha et de ses sous bassins -----	22
1.1. Caractéristiques géométrique et structurale -----	23
1.2. Caractérisation du réseau hydrographique-----	25
1.2.1. Densité de Drainage et Densité Hydrographique-----	25
1.2.2. Rapport de confluence (bifurcation ratio) -----	26
1.2.3. Rapport des Longueurs -----	26
1.2.4. Fréquence des talwegs élémentaires-----	26
1.2.4.Coefficient de torrentialité-----	26
1.2.5.Pente moyenne du cours d'eau-----	27
1.2.6.Temps de concentration-----	27
1.2.7. Nature fractale des réseaux hydrographiques -----	28
2. Courbes Hauteur-Volume et Hauteur-Surface -----	29
3. Modélisation Pluie-Débit -----	31
3.1.Le Modèle RS Minerve -----	31
3.2.Optimisation des modèles hydrologiques -----	33
4. Elaboration des différentes parties de la thèse-----	35
CHAPITRE I. GÉOLOGIE, HYDROGÉOLOGIE, GÉOMORPHOLOGIE, MORPHOPÉDOLOGIE ET BIOGÉOGRAPHIE-----	36
Introduction -----	37
I.1. Contexte géologique du bassin versant du Diarha -----	37
I.1.1. Le socle Antécambrien-----	37
I.1.2. La couverture du Paléozoïque -----	38
I.1.3. La tectonique post-ordovicienne -----	39
I.2. Contexte hydrogéologique du bassin du Diarha-----	40
I.3. Caractéristiques Géomorphologiques-----	42
I.4. Typologie des sols du bassin versant du Diarha-----	45
I.4.1. Les sols des plateaux et des buttes résiduels-----	45
I.4.2. Les sols des versants, pentes et glacis d'épandage -----	46
I.4.3. Les sols des bas-fonds -----	47
I.4.3.1. Les sols alluviaux -----	47
I.4.3.2. Les sols peu évolués d'apport -----	48
I.4.3.2.1. Les sols hydromorphes à pseudo-gley vertiques sur matériau argileux gonflant --	49
I.4.3.2.2. Les sols hydromorphes à pseudo-gley sur matériau gravillonnaire -----	49

I.5. Caractéristiques Biogéographiques-----	50
Conclusion -----	54
CHAPITRE II. CARACTERISTIQUES OROHYDROGRAPHIQUES DU BASSIN DU DIARHA	55
Introduction -----	56
II.1. Caractéristiques Morphométriques -----	56
II.1.1. Caractéristiques structurales du bassin versant du Diarha-----	56
II.1.1.1. Le Relief du bassin -----	56
II.1.1.2. Le système de Pente-----	58
II.1.2. Caractéristiques géométriques du bassin -----	59
II.2. Les caractéristiques du chevelu hydrographique -----	60
II.2.1. La Topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau -----	60
II.2.2. Les Pentes Caractéristiques du Réseau de Drainage -----	62
Conclusion -----	64
CHAPITRE III. CARACTERISATION DES BAS-FONDS DANS LES SOUS BASSINS DU DIARHA -----	65
III.1. Caractérisation des sous bassins versants du Diarha -----	66
III.1.1. Caractérisation des bassins de rive gauche -----	67
III.1.1.1. Le bassin versant du Termessé -----	67
III.1.1.1.1. Morphopédologie du bassin versant du Termessé -----	70
III.1.1.1.2. Occupation des sols du bassin versant du Termessé -----	71
III.1.1.1.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin du Termessé-----	73
III.1.1.2. Le bassin versant du Niogola -----	77
III.1.1.2.1. Morphopédologie du bassin versant du Niogola -----	80
III.1.1.2.2. Occupation des sols du bassin versant du Niogola-----	81
III.1.1.2.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin du Niogola -----	82
III.1.1.3. Le bassin versant du Bilèle -----	86
III.1.1.3.1. Morphopédologie du bassin versant du Bilèle-----	89
III.1.1.3.2. Occupation des sols du bassin versant du Bilèle -----	89
III.1.1.3.2. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Bilèle -----	91
III.1.2. Caractérisation des bassins de rive droite -----	95
III.1.2.1. Le bassin versant du Fangama-----	95
III.1.2.1.1. Morphopédologie du bassin versant du Fangama-----	98
III.1.2.1.2. Occupation des sols du bassin versant du Fangama -----	99
III.1.2.1.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Fangama -----	100
III.1.2.2. Le bassin versant du Diouguel -----	102
III.1.2.2.1. Morphopédologie du bassin versant du Diouguel-----	104
III.1.2.2.2. Occupation des sols du bassin versant du Diouguel -----	106
III.1.2.2.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Diouguel -----	107
III.1.2.3. Le bassin versant du Dakately-----	111
III.1.2.3.1. Morphopédologie du bassin versant du Dakately -----	113
III.1.2.3.2. Occupation des sols du bassin versant du Dakately -----	115
III.1.2.3.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Dakately-----	116
III.1.2.4. Le bassin versant du Gokodou -----	118
III.1.2.4.1. Morphopédologie du bassin versant du Gokodou-----	120
III.1.2.4.2. Occupation des sols du bassin versant du Gokodou -----	121
III.1.2.4.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Gokodou -----	122
III.1.2.5. Le bassin versant du Kéwé-----	124

III.1.2.5.1. Morphopédologie du bassin du Kéwé -----	126
III.1.2.5.2. Occupation des sols du bassin du Kéwé-----	127
III.1.2.5.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin du Kéwé -----	128
III.1.2.6. Le bassin versant du Mbéma -----	131
III.1.2.6.1. Morphopédologie du bassin du Mbéma -----	134
III.1.2.6.2. Occupation des sols du bassin du Mbéma-----	135
III.1.2.5.3. Caractéristiques des bas-fonds du bassin versant du Mbéma -----	136
III.2. Analyse Statistique des Données Physiographiques-----	139
III.2.1. Etude de corrélation entre données morphométriques -----	139
III.2.2. Bassins Homogènes par Pédologie -----	142
III.2.3. Typologie des bas-fonds en fonction des « unités paysagiques » -----	144
Conclusion -----	146
CHAPITRE IV. ÉLÉMENTS DU CLIMAT ET VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE-----	147
Introduction -----	148
IV.1. Circulation aérologique -----	148
IV.2. Paramètres Climatiques-----	149
IV.2.1. Les Températures-----	149
IV.2.2. L'insolation-----	151
IV.2.3. L'humidité relative -----	152
IV.2.4. Vitesse et direction des vents -----	152
IV.2.5. L'Evapotranspiration Potentielle (ETP) -----	157
IV.3. Etude de la Variabilité Pluviométrique -----	159
IV.3.2. Homogénéisation des données -----	161
IV.3.3. Tests de détection des ruptures sur les pluies annuelles -----	163
IV.3.4. Analyse de la pluviométrie à l'échelle annuelle et interannuelle -----	168
IV.3.4.1. Evolution des normales pluviométriques -----	170
IV.3.4.2. Evolution des pluies décennales -----	172
IV.3.5. Indices Standardisés des Précipitations annuelles -----	176
IV.3.6. Répartition spatiale des pluies annuelles-----	179
IV.3.7. Calcul de la pluie moyenne annuelle surfacique dans les sous bassins -----	183
IV.3.8. Analyse fréquentielle et détermination des quantiles secs et humides -----	187
IV.3.9. Analyse des précipitations mensuelles -----	192
IV.3.9.1. Répartition mensuelle de la pluviométrie des stations du Diarha-----	192
IV.3.9.2. Variations mensuelles de la pluviométrie des stations du Diarha -----	195
IV.3.9.3. Calcul de la pluie moyenne mensuelle surfacique -----	196
IV.3.9.3.1. Distribution mensuelle de la pluie moyenne surfacique -----	196
IV.3.9.3.2. Variations interannuelles de la pluie moyenne mensuelle surfacique -----	199
IV.3.9.4. Analyse fréquentielle de la pluie moyenne mensuelle surfacique -----	200
V.3.10. Pluviométrie Journalière -----	201
IV.3.10.1. Caractérisation des pluies journalières -----	202
IV.3.10.1.1. Calcul du nombre de jours de pluies -----	202
IV.3.10.1.2. Etude des fractions pluviométriques journalières -----	204
IV.3.10.2. Analyse fréquentielle des pluies journalières-----	209
Conclusion -----	211
CHAPITRE V. ÉTUDE HYDROLOGIQUE DU DIARHA ET DES BAS-FONDS DE SES SOUS BASSINS -----	213
Introduction -----	214
V.1. Données hydrométriques -----	214

V.2. Ecoulements annuels et interannuels-----	215
V.3. Répartition mensuelle des écoulements -----	218
V.4. Débits Caractéristiques de Crue et d'Étiage -----	222
V.5. Analyse fréquentielle des écoulements-----	223
V.5.1. Analyse des modules moyens annuels -----	223
V.5.2. Analyse statistique des débits maxima de crues -----	224
V.6. Analyse des écoulements en régime non influencé-----	225
V.7. Apports annuels des sous bassins du Diarha-----	227
V.7.1. Relation Pluie moyenne et Lamé d'eau écoulée -----	230
V.7.2. Recherche de relation entre Lamé d'eau écoulée et Morphologie -----	230
V.7.3. Relations Pluie moyenne, Lamé d'eau écoulée, Topographie -----	231
V.8. Modélisation du fonctionnement hydrologique des bas-fonds-----	233
V.8.1. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Mbéma-----	234
V.8.2. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Dakately -----	235
V.8.3. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Gokodou-----	236
V.8.4. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Kéwé -----	237
V.8.5. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Diouguel-----	238
V.8.6. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Bilèle-----	240
V.8.7. Fonctionnement hydrologique du bas-fond de Termessé -----	242
V.8.8. Fonctionnement hydrologique des bas-fonds de Fangama-----	244
V.8.9. Fonctionnement hydrologique des bas-fonds de Niogola -----	247
V.9. Classification des bas-fonds en fonction des « faciès » des régimes hydroclimatiques-----	252
Conclusion -----	256
CHAPITRE VI. IMPACTS HYDROLOGIQUES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES-----	257
Article scientifique-----	258
Résumé en français -----	258
Abstract-----	259
1. Introduction -----	260
2. Materials and Methods -----	261
2.1. Study area-----	261
2.2. Data and Tools -----	262
2.2.1. Observed Data -----	262
2.2.2. RS Minerve Model-----	264
2.3. Methods -----	266
2.3.1. Structure of Hydrological Models -----	266
2.3.2. Optimization of hydrological models -----	269
2.3.3. Downscaling of Regional Climate Models-----	270
3. Results -----	272
3.1. Efficiency of the SAC-SMA model in cross-validation phase -----	272
3.2. Efficiency of the GR4J model in cross-validation phase -----	272
3.3. Future Temperature and Precipitation Changes-----	275
3.4. Evolution of Annual Streamflow and Characteristic Flow Rates by 2050 -----	277
4. Discussions and Conclusions -----	282
CHAPITRE VII. IMPACTS ECOLOGIQUES DU CLIMAT-----	287
Article scientifique-----	288
Résumé en français -----	288
Abstract-----	289
1. Introduction -----	289
2. Study Area -----	291
3. Materials and methods -----	292

3.1. Topographic Factor (LS) -----	292
3.2. Anti-Erosion Cultural Practices -----	293
3.3. Soil Erodibility Analysis -----	294
3.4. Rainfall Erosivity Analysis -----	295
3.5. Cover Management Analysis -----	296
3.6. Soil Loss Modeling-----	297
4. Results and discussions -----	298
4.1. Topographic Factor (LS) -----	298
4.2. Climatic Erosivity (R-factor) -----	300
4.3. Soil Erodibility (K-factor)-----	301
4.4. Anti-Erosion Cultural Practices (P-factor)-----	302
4.5. Cover Management C-factor-----	302
4.6. Potential Annual Soil Losses -----	304
5. Conclusion -----	305
CHAPITRE VIII. ETUDE DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES BAS-FONDS -----	307
Introduction -----	308
VIII.1. Perception de l'espace par les populations-----	308
VIII.1.1. L'espace ethnique -----	308
VIII.1.2. L'espace écologique -----	310
VIII.1.2.1. La toponymie -----	310
VIII.1.2.1.1. Les unités topographiques -----	310
VIII.1.2.1.2. Les unités hydroclimatiques-----	311
VIII.1.2.1.3. Les formations végétales -----	311
VIII.2. Localisation spatiale des activités humaines-----	312
VIII.2.1. Les Types de Cultures -----	313
VIII.2.2. Superficies des parcelles exploitées -----	314
VIII.2.3. Les calendriers culturels -----	316
VIII.2.3.1. Le calendrier culturel du riz -----	316
VIII.2.3.2. Calendrier culturel du maïs -----	318
VIII.2.3.3. Calendrier culturel de l'arachide-----	318
VIII.2.3.4. Le calendrier culturel du coton-----	319
VIII.2.4. La question foncière-----	319
VIII.2.4.1. Les acteurs internes -----	320
VIII.2.4.2. Les acteurs externes (le Système d'appui)-----	321
VIII.2.5. Rendement et Production-----	322
VIII.3. Impact de la Pluviométrie sur la Production Agricole -----	326
VIII.4. Le système poste-récolte-----	328
VIII.5. L'eau dans les bas-fonds-----	330
VIII.5.1. Modes d'accès à l'eau dans les bas-fonds -----	332
VIII.6. Les contraintes à la mise en valeur des bas-fonds -----	334
VIII.6.1. Les contraintes naturelles -----	334
VIII.6.1.1. L'eau -----	334
VIII.6.1.2. Les adventices -----	335
VIII.6.2. Les contraintes techniques -----	335
VIII.7. Les perspectives et stratégies d'adaptation -----	337
Conclusion -----	338
CONCLUSION GÉNÉRALE-----	339
BIBLIOGRAPHIE-----	342
Annexes -----	356

Table des matières

Table des matières -----	364
Liste des figures -----	370
Liste des Tableaux -----	377
Liste des photos -----	380
VALORISATION DE LA THESE -----	381

Liste des figures

Figure 1. Localisation du bassin versant du Diarha.....	8
Figure 2. Coupe en travers d'un vallon (source Berton S., 1988).....	14
Figure 3. Place du bas-fond dans la toposéquence selon Berton S., (1988).....	14
Figure 4. Algorithme pour la délimitation des bassins et du système de drainage.....	23
Figure 5. Indices de compacité de Gravelius et forme des bassins versants (Musy A., et Higby C., 2004)	24
Figure 6. Relation Hauteur-Volume-Surface dans Surfer 14.....	30
Figure 7. Topologie du modèle complet GR4J: production, transfert puis transport.....	32
Figure 8. Topologie du modèle complet SAC-SMA: production, transfert puis transport.....	33
Figure 9. Esquisse hydrogéologique du bassin versant du Diarha.....	41
Figure 10. Schéma conceptuel de configuration d'une aquifère du socle (Source : DGPRES, 2015).....	42
Figure 11. Les grandes unités géomorphologiques du bassin versant du Diarha.....	43
Figure 11a : Profil en travers du bassin versant du Diarha.....	44
Figure 11b: Profil en long du bassin du bassin versant du Diarha.....	44
Figure 12. Morphopédologie du bassin versant du Diarha.....	47
Figure 13. Image Google Earth de 2018 couvrant l'aire d'étude.....	51
Figure 14. Bassin du Diarha – Carte d'occupation des sols.....	51
Figure 15. Bassin du Diarha - Pourcentages des unités d'occupation du sol identifiées.....	53
Figure 16. Courbes de niveau équidistantes de 20 m du bassin versant du Diarha.....	57
Figure 17. Répartition spatiale des pentes (en degré et en pourcentage) du bassin du Diarha.....	58
Figure 18 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Diarha.....	59
Figure 19. Hiérarchisation du cours d'eau selon la méthode de Horton-Strahler.....	61
Figure 20. Centre de gravité, longueur des talwegs et confluence des bifurcations du Diarha.....	61
Figure 21. Ajustement graphique de la droite aux couples N_x , L_i et x	62
Figure 22. Les sous bassins versants du Diarha.....	66
Figure 23. Profil en long du Termessé.....	67
Figure 24. MNT 3D du bassin versant du Termessé.....	67
Figure 25. Courbe hypsométrique du bassin versant du Termessé.....	68
Figure 26. Le système de pentes du bassin versant du Termessé.....	69
Figure 27. Le réseau de drainage du bassin versant du Termessé.....	70
Figure 28. Bassin du Termessé – Carte morphopédologique.....	71
Figure 29. Bassin du Termessé – Carte d'occupation des sols.....	72
Figure 30. Bassin du Termessé - Pourcentage des unités d'occupation du sol.....	72
Figure 31.a – Profils en travers des bas-fonds du bassin du Termessé.....	75
Figure 31.b – Profils en travers des bas-fonds du bassin du Termessé.....	76

Figure 32. MNT 3D du bassin versant du Niogola.....	77
Figure 33. Courbe hypsométrique du bassin du Niogola.....	78
Figure 34. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Niogola.....	79
Figure 35. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Niogola.....	79
Figure 36. Bassin du Niogola – Carte morphopédologique.....	80
Figure 37. Bassin du Niogola – statistiques des unités pédologiques.....	80
Figure 38. Bassin du Niogola – Carte d’occupation des sols.....	81
Figure 39. Proportion des unités d’occupation des sols du bassin de Niogola.....	82
Figure 40. Profils en travers des bas-fonds du site de Niogola.....	84
Figure 41. Profil en travers du bas-fond du village de Parawol.....	84
Figure 41. Profil en travers du bas-fond de Sabéré.....	85
Figure 42. MNT 3D du bassin versant du Bilèle.....	86
Figure 43. Courbe hypsométrique du bassin versant du Bilèle.....	87
Figure 44. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Bilèle.....	88
Figure 45. Hiérarchisation du réseau hydrographique du marigot de Bilèle.....	88
Figure 46. Bassin du Bilèle – Carte morphopédologique.....	89
Figure 47. Bassin de Bilèle – Carte d’occupation des sols.....	90
Figure 48. Proportion des unités d’occupation des sols du bassin du Bilèle.....	90
Figure 49. Profil 3D du premier tronçon (tête de bas-fond en spatule).....	91
Figure 50. Profil en 3D du bas-fond de la partie centrale.....	92
Figure 51. Profil en 3D du bas-fond de la partie avale.....	94
Figure 52. Profils en travers des trois premiers tronçons de bas-fonds du Bilèle.....	94
Figure 53. Profil en travers du quatrième tronçon du bas-fond du Bilèle.....	94
Figure 54. Hiérarchisation du réseau hydrographique du marigot de Fangama.....	95
Figure 55. MNT 3D du bassin versant du Fangama.....	96
Figure 56. Courbe hypsométrique du bassin versant du Fangama.....	96
Figure 57. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Fangama.....	97
Figure 58. Bassin du Fangama – Carte morphopédologique.....	98
Figure 59. Bassin du Fangama – Pourcentages des différents ensembles de sols.....	99
Figure 60. Bassin du Fangama – Carte d’occupation des sols.....	100
Figure 61. Bassin du Fangama – Pourcentages des unités d’occupation des sols.....	100
Figure 62. Profil en travers du bas-fond de l’axe Sintiou-Bayq.....	101
Figure 63. Profil en travers du bas-fond du village de Fangama.....	101
Figure 64. Courbes de niveau équidistantes de 10 m et MNT 3D du bassin du Diouguel.....	102
Figure 65. Courbe hypsométrique du bassin versant du Diouguel.....	103
Figure 66. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Diouguel.....	103
Figure 67. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Diouguel.....	104

Figure 68. Morpho-pédologie du bassin du Diouguel.....	105
Figure 69. Bassin du Diouguel – Pourcentages des différents ensembles de sols.....	105
Figure 70. Bassin du Diouguel – Carte d’occupation des sols.....	106
Figure 71. Bassin du Diouguel – Pourcentages des unités d’occupation des sols.....	107
Figure 72. Pentas transversales du bas-fond de Neppen Diakha.....	107
Figure 73. Tête de bas-fond localisée dans le village de Neppen Diakha.....	108
Figure 74. Pentas transversales du bas-fond d’Outiounbel.....	108
Figure 75. Profil 3D du bas-fond d’Outiounbel.....	109
Figure 76. Pentas transversales du bas-fond de Négodié.....	109
Figure 77. Pentas transversales du bas-fond de la partie avale (Diouguel).....	110
Figure 78. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Dakately.....	111
Figure 79. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Dakately.....	112
Figure 80. Répartition spatiale des pentes du bassin versant du Dakately.....	112
Figure 81. Courbe hypsométrique du bassin du Dakately.....	113
Figure 82. Bassin du Dakately – Carte morpho-pédologique.....	114
Figure 83. Bassin du Dakately – Pourcentage des unités pédologiques.....	114
Figure 84. Bassin du Dakately – Carte d’occupation des sols.....	115
Figure 85. Bassin du Dakately – Pourcentages des unités d’occupation des sols.....	115
Figure 86. Profil en travers de la tête de bas-fond (sud-est de Dakately).....	117
Figure 87. Profil en travers du bas-fond de Lally.....	117
Figure 88. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Gokodou.....	118
Figure 89. Répartition spatiale des pentes du bassin du Gokodou.....	119
Figure 90. Courbe hypsométrique du bassin du Gokodou.....	120
Figure 91. Bassin du Gokodou – Carte des types de sols.....	120
Figure 92. Pourcentage des types de sols du bassin du Gokodou.....	121
Figure 93. Occupation des sols du bassin du Gokodou.....	121
Figure 94. Pourcentages des unités d’occupation des sols du bassin du Gokodou.....	122
Figure 95. Profil en travers du bas-fond du Gokodou (secteur nord-est).....	122
Figure 96. Profil en travers de la vallée de Gokodou.....	123
Figure 98. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Kéwé.....	124
Figure 99. Répartition spatiale des pentes du bassin du Kéwé.....	125
Figure 100. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Kéwé.....	125
Figure 101. Bassin du Kéwé – Carte morphopédologique.....	126
Figure 102. Bassin versant du Kéwé – statistiques en pourcentages des unités pédologiques.....	127
Figure 103. Bassin du Kéwé – statistique (%) des unités d’occupations des sols.....	127
Figure 104. Bassin versant du Kéwé – Carte d’occupation des sols.....	128
Figure 105. Profil en travers du bas-fond de Kéwé.....	129

Figure 106. Profil en travers des bas-fonds des villages de Thiankoye et de Béhira-Foula.....	129
Figure 107. Profil en travers de la vallée principale du Kéwé.....	130
Figure 108. Courbes de niveau équidistantes de 5 m et MNT 3D du bassin du Mbéma.....	131
Figure 109. Répartition spatiale des pentes du bassin du Mbéma.....	132
Figure 110. Courbe hypsométrique du bassin versant du Mbéma.....	133
Figure 111. Hiérarchisation du réseau hydrographique du Mbéma.....	133
Figure 112. Bassin du Mbéma – Carte des types de sols.....	134
Figure 113. Bassin du Mbéma – statistiques (en %) des types de sols.....	135
Figure 114. Bassin du Mbéma – statistiques (en %) des unités d’occupation des sols.....	135
Figure 115. Bassin du Mbéma – Carte d’occupation des sols.....	136
Figure 116. Profil transversal du bas-fond de l’axe Dar Salam - Guémau.....	137
Figure 117. Profil transversal du bas-fond du village de Mbéma.....	137
Figure 118. Profil transversal de la vallée principale du Mbéma.....	138
Figure 119. Distribution statistique des axes factoriels des variables.....	139
Figure 120. Contribution des variables et des observations actives sur les plans factoriels 1, 2.....	142
Figure 121. ACP montrant les similarités pédologiques entre les bassins.....	142
Figure 122. Classification des bas-fonds à l’aide de la méthode de l’ACP.....	145
Figure 123. Traits de la circulation aérologique en Afrique de l’Ouest (Leroux M., 1983).....	148
Figure 124. Moyennes mensuelles des températures à Labé (1960-2015) et à Kédougou (1960-2017).....	150
Figure 125. Moyennes mensuelles de l’insolation à Labé (1981-2001) et à Kédougou (1984-2017).....	151
Figure 126. Moyennes mensuelles de l’humidité relative à Kédougou (1960 à 2017) et à Labé (1971-2001).....	151
Figure 127. Moyennes mensuelles de l’évaporation à Kédougou (1970-2017).....	152
Figure 128. Direction moyenne du vent à Kédougou (1980-2017).....	153
Figure 129. Direction moyenne du vent à Labé (1970-2001).....	154
Figure 130. Moyennes mensuelles de la vitesse des vents à Kédougou (1980-2017) et Labé (1971-2001).....	154
Figure 131. Moyennes mensuelles de l’ETP à Kédougou (1960-2017) et Labé (1950-2015).....	156
Figure 132. Bassin versant du Diarha- Carte de situation du réseau pluviométrique.....	158
Figure 133. Organigramme du fonctionnement du programme <i>Missing Rainfall</i> (MissRF).....	160
Figure 134. Mise en évidence de la présence de ruptures par l’Ellipse de Bois dans la série des pluies annuelles de Tougué et Mali à tous les seuils de confiance.....	164
Figure 135. Détection de ruptures sur les pluies annuelles pour quelques stations du bassin du Diarha.....	165
Figure 136. Variations des pluies annuelles de 1921 à 2016 aux principales stations pluviométriques.....	167
Figure 137. Indices standardisés des précipitations annuelles de quelques stations du bassin du Diarha.....	170

Figure 138. Variation annuelle des lames d'eau précipitées du Diarha et de ses sous bassins de 1921 à 2016.....	175
Figure 139. Carte des variations spatiales de la pluviométrie annuelle sur le bassin du Diarha.....	176
Figure 140. Bassin du Diarha-Cartes de spatialisation des isohyètes trentenaires.....	177
Figure 141. Bassin du Diarha-Cartes de spatialisation des pluies moyennes décennales.....	179
Figure 142. Ajustement des pluies annuelles des stations du bassin du Diarha (1921-2016).....	181
Figure 143. Bassin du Diarha-Cartes isovaleurs des pluies annuelles de récurrences sèches et humides.....	184
Figure 144. Variations saisonnières des pluies des principales stations du Diarha avant et après rupture.....	189
Figure 145. Variation interannuelle de la lame d'eau précipitée mensuelle avant et après rupture...	192
Figure 146. Nombre moyen de jours de pluies par an des stations de l'étude.....	195
Figure 147. Evolution du nombre de jours de pluies en fonction de la latitude.....	195
Figure 148. Variation du nombre de jours de pluies de part et d'autre de la date de rupture dans les séries pluviométriques annuelles.....	195
Figure 149. Variations des fractions pluviométriques journalières de quelques stations.....	198
Figure 150. Bassin du Diarha - Carte de répartition spatiale des pluies journalières fréquentielles....	202
Figure 151. Courbe d'étalonnage du Diarha au pont routier.....	206
Figure 152. Variations des modules (m^3/s) du Diarha au pont routier de 1961 à 2012.....	207
Figure 153. Indices standardisés des débits moyens annuels du Diarha sur la période 1961-2012....	208
Figure 154. Débits moyens mensuels (m^3/s) du Diarha avant et après 1968.....	210
Figure 155. Débits caractéristiques de crues et d'étiages du Diarha.....	213
Figure 156. Bassin du Diarha - Distribution statistique des débits de crues maximales journalières...	215
Figure 157. Situation géographique du Thiokoye et du Sili par rapport au bassin du Diarha.....	217
Figure 158. Relation pluie moyenne surfacique et lame d'eau écoulée.....	220
Figure 159. Relation lame d'eau écoulée et morphologie.....	221
Figure 160. Relation pluie de fréquence médiane et altitude moyenne.....	222
Figure 161. Relation lame d'eau écoulée et altitude moyenne.....	222
Figure 162. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Mbéma.....	225
Figure 163. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Dakately.....	226
Figure 164. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Gokodou.....	227
Figure 165. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Kéwé.....	228
Figure 166. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Diouguel.....	230
Figure 167. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Bilèle.....	232
Figure 168. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Termessé.....	233
Figure 169. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Sintiou-Bayq.....	235
Figure 170. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond du village de Fangama.....	237
Figure 171. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond du village de Niogola.....	241
Figure 172. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond du village de Parawol.....	241

Figure 173. Courbes hauteur-volume-surface du bas-fond de Sabéré.....	241
Figure 174. ACP montrant la similarité des bas-fonds en fonction des « faciès ».....	243
Figure 175. Typologie des bas-fonds des sous bassins du Diarha : rôle des paramètres physiques et hydroclimatiques.....	245
Figure.176. Diarha watershed - Location map of measurement networks.....	253
Figure.177. Topology of the full model GR4J: production, transfer then transport.....	255
Figure.178. Topology of the full model SAC-SMA: production, transfer then transport.....	255
Figure.179. Conceptual scheme of the GR4J model (Garcia Hernandez <i>et al.</i> 2018).....	257
Figure.180. Conceptual scheme of the SAC-SMA model (Garcia Hernandez <i>et al.</i> 2018).....	259
Figure.181. Calibration of the SAC-SMA model over the period 1975-1992.....	262
Figure.182. Validation of the SAC-SMA model over the period 1998-2003.....	262
Figure.183. Calibration of the GR4J model over the 1975-1992 period.....	263
Figure.184. Validation of the GR4J model over the period 1998-2003.....	263
Figure.185. Observed and simulated daily hydrograph of Diarha.....	264
Figure.186. Demonstration of the presence of rupture at all thresholds of confidence by the Bois' Ellipse on the annual flows of Diarha.....	264
Figure.187. Temperature biases corrected under RCP4.5 and RCP8.5.....	265
Figure.188. Precipitation biases corrected under RCP4.5 and RCP8.5.....	266
Figure.189. Projected average temperatures of the Diarha basin under RCP4.5 and RCP8.5.....	266
Figure. 190. Relative (a, b) and Absolute (c, d) changes of annual rainfall for the Diarha River under RCP4.5 and RCP8.5.....	267
Figure 191. Relative change of mean annual flow for the Diarha River under RCP4.5.....	268
Figure 192. Relative change of mean annual flow for the Diarha River under RCP8.5.....	268
Figure.193. Evolution of characteristic flow rates (DCC and DCE) by 2050 under the RCP4.5 scenario.....	270
Figure.194. Evolution of characteristic flow rates (DCC and DCE) by 2050 under the RCP8.5 scenario.....	271
Figure 195. Location of the Diarha watershed in the Gambia River catchment area.....	281
Figure 196. Mapping of the main soil types of the Diarha watershed.....	284
Figure 197. Spatial variation of rainfall in the Diarha Basin.....	286
Figure 198. Sub-watersheds Map.....	287
Figure 199. Synthesis of the methodological approach used.....	288
Figure 200. Diarha watershed Slope System.....	289
Figure 201. Digital Elevation Model Map.....	289
Figure 202. Flow Direction Map.....	289
Figure 203. Flow Accumulation Map.....	289
Figure 204. Slope Map (Percentage).....	289
Figure 205. Beta Parameter Map.....	289
Figure 206. Exponent m Map.....	289

Figure 207. S Factor Map.....	289
Figure 208. L Factor Map.....	289
Figure 209. LS Factor Map.....	290
Figure 210. Map of climatic erosivity (R factor).....	291
Figure 211. K-factor Map.....	291
Figure 212. P Factor Map.....	292
Figure 213. Cover Management C Factor Map.....	293
Figure 214. NDVI Map.....	293
Figure 215. Land use Map.....	293
Figure 216. Potential Soil Loss Map.....	294
Figure 217. Carte de la disposition des villages dans le bassin.....	299
Figure 218. Les secteurs d'activités dans le bassin du Diarha (Source enquête de terrain).....	302
Figure 219. Les outils de travail dans les bas-fonds du Diarha.....	302
Figure 220. Les types de cultures dans les bas-fonds du Diarha	303
Figure 221. Les types de spéculations en saison des pluies.....	303
Figure 222. Les types de spéculations en saison sèche.....	304
Figure 223. Lames d'eau précipitée (1921-2016) et débits (1961-2012) moyens mensuels du bassin du Diarha.....	307
Figure 224. Organisation du travail par les exploitants des bas-fonds.....	310
Figure 225. Statut d'occupation des parcelles des bas-fonds.....	311
Figure 226. Poids du système d'appui dans l'économie rurale du bassin du Diarha.....	312
Figure 227. Perception des rendements par les exploitants agricoles.....	312
Figure 228. Box-plot des spéculations de cultures pluviales.....	313
Figure 229. Corrélation superficies emblavées et productions agricoles.....	314
Figure 230. Evolution comparée des superficies emblavées et des productions agricoles (<i>source CR. Salemata</i>).....	314
Figure 231. Courbe de variation pluie moyenne et production de chaque spéculation.....	316
Figure 232. Corrélation entre pluviométrie et production de chaque spéculation.....	317
Figure 233. Poids de l'autoconsommation et de la vente.....	318
Figure 234. Lieux de vente des produits agricoles.....	319
Figure 235. Niveau d'instruction des exploitants des bas-fonds.....	320
Figure 236. Usage de fertilisants agricoles.....	321
Figure 237. Les produits chimiques utilisés dans la mise en valeur.....	322
Figure 238. Sources de l'eau pour les cultures maraîchères.....	323

Liste des Tableaux

Tableau 1. Nombre de bas-fonds enquêtés par Commune.....	21
Tableau 2. Paramètres des Unités de Réponse Hydrologiques.....	32
Tableau 3. Indicateurs de performance.....	33
Tableau 4. Caractéristiques physico-chimiques des sols de bas-fonds (Thioubou A., 1995)	48
Tableau 5. Morphométrie de la topographie du bassin.....	57
Tableau 6. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Diarha.....	59
Tableau 7. La dénivelée spécifique (D_s) selon la classification IRD.....	59
Tableau 8. Rapports de confluences et de longueurs du réseau de drainage.....	63
Tableau 9. Autres caractéristiques du chevelu hydrographique.....	63
Tableau 10. Morphométrie de la topographie du bassin du Termessé.....	68
Tableau 11. Synthèse des paramètres morphométriques du bassin du Termessé.....	68
Tableau 12. Caractéristiques du réseau de drainage du Termessé.....	70
Tableau 13. Morphométrie des bas-fonds du bassin versant du Termessé.....	73
Tableau 14. Morphométrie de la topographie du bassin du Niogola.....	77
Tableau 15. Synthèse des paramètres morphométriques du bassin du Niogola.....	78
Tableau 16. Caractéristiques du réseau de drainage du bassin versant du Niogola.....	78
Tableau 17. Morphométrie des bas-fonds du site de Niogola.....	82
Tableau 18. Morphométrie de la topographie du bassin versant du Bilèle.....	86
Tableau 19. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Bilèle.....	87
Tableau 20. Morphométrie de la topographie du bassin du Fangama.....	95
Tableau 21. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Fangama.....	97
Tableau 22. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin du Diouguel.....	102
Tableau 23. Morphométrie de la topographie du bassin du Diouguel.....	102
Tableau 24. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin versant du Dakately.....	111
Tableau 25. Morphométrie de la topographie du bassin versant du Dakately.....	111
Tableau 26. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin du Gokodou.....	118
Tableau 27. Morphométrie de la topographie du bassin du Gokodou.....	119
Tableau 28. Synthèse des caractéristiques morphométriques du bassin du Kéwé.....	124
Tableau 29. Morphométrie de la topographie du bassin du Kéwé.....	124
Tableau 30. Synthèse des caractéristiques morphométrique et altitudinale du bassin du Mbéma.....	132
Tableau 31. Valeurs propres de la matrice de corrélation des paramètres morphométriques.....	140
Tableau 32. Matrice de corrélation entre les variables morphométriques.....	140
Tableau 33. Corrélation entre les variables et les trois axes factoriels retenus.....	141
Tableau 34. Statistiques des Températures moyennes mensuelles à Kédougou et Labé.....	150

Tableau 35. Statistiques de l'insolation moyenne mensuelle à Kédougou et Labé.....	151
Tableau 36. Statistiques de l'humidité relative moyenne mensuelle à Kédougou et Labé.....	152
Tableau 37. Fréquence et directions des vents dominants en % à Kédougou de 1980 à 2017.....	154
Tableau 38. Fréquence et directions des vents dominants en % à Labé de 1970 à 2001.....	156
Tableau 39. Inventaire des données de pluies journalières observées.....	160
Tableau 40. Statistiques descriptives des données pluviométriques des stations du bassin du Diarha.....	163
Tableau 41. Résultats des tests statistiques appliqués aux chroniques de pluies annuelles.....	165
Tableau 42. Moyennes pluviométriques annuelles (mm) des normales de 1921-50 à 1981-2010....	170
Tableau 43. Ecart par rapport à la normale de référence.....	171
Tableau 44. Moyennes pluviométriques décennales (mm).....	172
Tableau 45. Ecart par rapport à la décennale de référence (1961-1970)	173
Tableau 46. Variations des pluies moyennes interannuelles des stations du Diarha.....	175
Tableau 47. Proportions (en %) d'années sèches et humides par station.....	178
Tableau 48. Pluies moyennes décennales et de long terme (1921-2016) des sous bassins.....	184
Tableau 49. Bassin versant du Diarha - Pluies annuelles récurrentielles (mm).....	189
Tableau 50. Distribution moyenne mensuelle des pluies des principales stations du Diarha.....	193
Tableau 51. Distribution statistique de la pluie moyenne mensuelle surfacique.....	198
Tableau 52. Bassin du Diarha – Lames d'eau précipitées mensuelles récurrentielles (mm).....	200
Tableau 53. Quelques paramètres statistiques des fractions pluviométriques des stations de l'étude.....	206
Tableau 54. Bassin versant du Diarha – Statistiques des pluies journalières fréquentielles (mm).....	210
Tableau 55. Bassin du Diarha - Inventaire des cotes et débits de 1961 à 2012.....	215
Tableau 56. Modules annuels moyens, écart-types et coefficient de variation à la station du Diarha.....	216
Tableau 57. Bassin du Diarha – Débits moyens mensuels (m ³ /s) avant et après 1968.....	219
Tableau 58. Fréquences d'apparition mensuelle des débits maximums.....	220
Tableau 59. Débits caractéristiques du Diarha au pont routier.....	222
Tableau 60. Modules annuels récurrentiels (m ³ /s) à Diarha-pont.....	224
Tableau 61. Volumes annuels récurrentiels (10 ⁶ m ³) à Diarha-pont.....	224
Tableau 62. Bassin du Diarha - Quantiles des débits maxima journaliers fréquentiels des crues.....	224
Tableau 63. Caractéristiques des tarissements du Diarha.....	226
Tableau 64. Les modules médians, décennaux secs et humides du Thiokoye et du Sili.....	228
Tableau 65. Rapport des surfaces des sous bassins du Diarha.....	228
Tableau 66. Sous bassins du Diarha – Modules médians, décennaux secs et humides.....	229

Tableau 67. Sous bassins du Diarha – Apports annuels médians, décennaux sec et humide.....	229
Tableau 68. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Mbéma.....	234
Tableau 69. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Dakately.....	235
Tableau 70. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Gokodou.....	236
Tableau 71. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Kéwé.....	237
Tableau 72. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Diouguel.....	239
Tableau 73. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Bilèle.....	241
Tableau 74. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Termessé.....	242
Tableau 75. Cotes de remplissage, volume et potentiel inondable du bas-fond de Sintiou-Bayq....	244
Tableau 76. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du village de Fangama.....	246
Tableau 77. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du village de Niogola.....	248
Tableau 78. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du site de Parawol.....	249
Tableau 79. Cotes, volume et potentiel inondable du bas-fond du site de Sabéré.....	250
Table.80. Inventory of rainfall and daily temperature data observed.....	262
Table.81. Parameters of Hydrological Response Units.....	265
Table.82. Initial parameters and conditions of the SAC-SMA model.....	268
Table.83. Performance indicators.....	269
Table.84. Regional Climate Models (RCM) used in this study.....	271
Table.85. Segmentation of the annual flow series of the Diarha Basin.....	275
Table.86. Characteristics flow rates used.....	278
Table A1. Relative change in characteristic high flows for different used RCM under RCP4.5	285
Table.A2. Relative change in flows below the median for different chosen RCM under RCP4.5...	285
Table.A3. Relative change in characteristic high flows for different used RCM under RCP8.5	286
Table.A4. Relative change in flows below the median for different chosen RCM under RCP8.5...	286
Table 87. Value of P factor (Ref Singh, 1994)	293
Table 88. Diarha K factor and Organic Matter (OM) values for different textures (Ref- HWSD) ...	294
Table 89. Description of satellite images data.....	296
Table 90. Classes of annual Rainfall erosivity (R-factor)	300
Table 91. Statistics of Land use classes.....	304
Table 92. Classes and Statistics of Potential Soil losses.....	305
Table 93. Potential Soil Loss per Sub-watershed.....	305
Tableau 94. Répartition ethnique dans le bassin versant du Diarha.....	309
Tableau 95. Evolution des superficies emblavées (en ha) pour diverses spéculations entre 1988-1993 et 2010-2019 (Source CR. Salemata)	315
Tableau 96. Caractéristiques démographiques des principales localités du bassin du Diarha (Source CR. Salemata)	315
Tableau 97. Calendrier culturel des bas-fonds du bassin du Diarha.....	316
Tableau 98. Le calendrier agricole du riz.....	317
Tableau 99. Le calendrier agricole du maïs.....	318
Tableau 100. Le calendrier agricole de l'arachide.....	318
Tableau 101. Calendrier agricole du coton.....	319
Tableau 102. Production par habitant pour diverses spéculations.....	320
Tableau 103. Tendances de la production agricole (en tonnes) entre 1988-1993 et 2009-2019 (Source CR. Salemata)	325
Tableau 104. Synthèse des contraintes de la mise en valeur des bas-fonds.....	336

Liste des photos

Photo 1. L’outil Hauteur-Volume dans Surfer 14.....	30
Photo 2. Sols vertiques de la vallée de Diouguel.....	49
Photo 3. Unités paysagiques identifiées (vue au Sol)	52
Photo 4. Défrichage et feux de brousse : Quel avenir face à la menace écologique ?.....	53
Photo 5. Station hydrométrique du Diarha-pont.....	205
Photo 6. Cultures commerciales dans les bas-fonds du Bilèle.....	319
Photo 7. Modes d’accès à l’eau dans les bas-fonds du Diarha.....	323

VALORISATION DE LA THESE