

# UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR des Sciences et Technologies

Département de Géographie

Master : « Espace, Société, Environnement et Développement »

Spécialité : Environnement et Développement

Mémoire de Master



## DYNAMIQUE DES RESSOURCES EN EAU ET IMPACTS SUR LES ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES : CAS DU BASSIN VERSANT DU NIAOULE (TAMBACOUNDA)

Présenté par :

Serigne Mory Kouma SENE

Sous la direction de :

Pr. Cheikh FAYE

Membres du jury :

Prénom (s) et Nom	Grade	Qualité	Etablissement
Ibrahima MBAYE	Maître de conférences	Président de jury	UASZ
Cheikh FAYE	Maître de conférences	Directeur de mémoire	UASZ
Aïdara C.A. Lamine FALL	Maître-assistant	Examineur	UASZ
Demba GAYE	Assistant	Examineur	UASZ

**Année universitaire 2020-2021**

## Dédicaces

---

Je dédie ce travail à :

Mes défunts grands-parents

Ma grand-mère Adja Ndèye Marie SARR

Mon père et ma mère

Mes oncles et tantes

Mes frères, sœurs, cousins, cousines et amis

## Remerciements

---

J'adresse une mention spéciale à mon directeur de mémoire en l'occurrence Pr Cheikh FAYE pour son soutien constant, sa rigueur scientifique, ses remarques et ses orientations pertinentes qui m'ont permis d'avancer dans mes recherches.

Je remercie tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Par-là, je veux nommer :

- Pr Ibrahima MBAYE qui a accepté de présider le jury et qui a également participé dans le processus d'acquisition des données climatiques sous la casquette de chef du Département de Géographie ;
- Dr Aïdara Cherif Amadou Lamine FALL et Dr Demba GAYE qui ont accepté d'examiner le travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les autres enseignants du Département de Géographie de l'UASZ pour le sérieux, la disponibilité et la qualité des enseignements dispensés. Je veux citer Pr Oumar SY, Pr Tidiane SANE, Dr El Hadji Balla DIEYE, Dr Oumar SALL, Dr Alvares Gualdino Fofoué BENGA, Pr Abdourahmane Mbade SENE.

Je remercie vivement Pr El Hadj Salif Diop et Dr Boubacar SOLLY pour leurs conseils et orientations.

Je remercie aussi Bakary FATY de la DGPRES pour m'avoir aidé à obtenir les données hydrométriques de la station de Niaoulé-Tanou.

J'adresse mes reconnaissances à Monsieur Malang Seyni SYLLA, Maire de la Commune de Missirah et sa famille pour m'avoir accueillie à bras ouvert et hébergé lors de mes travaux de terrain. Je remercie aussi Monsieur Mouhamadou SYLLA, ancien responsable du développement local et Monsieur SONKO, vétérinaire et agent de l'ANCAR pour avoir mis à ma disposition des documents statuant sur la situation de référence de la zone d'étude. Il y va de même pour les chefs de village de la zone d'étude pour l'accueil et la disponibilité, sans oublier mes compagnons de terrain qui m'ont aidé pour la traduction des langues locales (Alpha

Oumar BA, Aliou DIALLO, Thierno DRAME, Abdoulaye KONTE et Adama SYLLA) en français ou wolof.

Je rends un grand hommage à tous mes parents du côté de Dakar et de Mbour pour la patience, le soutien moral et financier ainsi que la générosité qu'ils ont eu à mon égard. Par-là, je voudrais citer les familles SARR, NGOM, NIANG, SENE et DIOP.

Je remercie chaleureusement mes parents de Ziguinchor notamment la famille NDAO aux HLM Néma, la famille DIADHIOU à Korentas, les familles SONKO à Santhiaba et aux HLM et la famille CISSE à Bignona.

Je suis particulièrement reconnaissant envers mes amis(es) qui n'ont cessé de m'encourager. Il s'agit de Moustapha Mbacké DIEDHIOU, Salimata DIADHIOU, Oumy DIENG, Sadio SANE, Alassane BALDE, Aliou DIENG, Pauline GOMIS, Aïda BOYE, Ndèye Rokhaya BA, Assane BADIANE, Ousseynou TOURE, Salif DEME, Ousmane Daouda NDIAYE, Ndiaga CISSE, Seydina Limamoulaye DIARRA, Youssouf TIRERA, Oumar SYLLA, Mame Sarang COLY, Assane CISSE, Chamsedine SY, Serigne FAYE, Michel NGOM et Joséphine NDIAYE.

Je remercie également tous les doctorants(es) et docteurs du Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE) pour leur disponibilité et les encouragements, ainsi que tous mes promotionnaires du Master.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à toutes les personnes que j'ai omis de citer ici et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail à travers leurs aides, conseils et suggestions.

## Sigles et abréviations

---

<b>ANACIM</b>	: Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
<b>ANCAR</b>	: Agence Nationale de Conseil Agricole et Rurale
<b>ANSD</b>	: Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
<b>CCNUCC</b>	: Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements climatiques
<b>CSE</b>	: Centre de Suivi Ecologique
<b>DGPRE</b>	: Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
<b>ENDA</b>	: Environnement Développement Action
<b>FAO</b>	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et L'Agriculture
<b>GIEC</b>	: Groupe d'Experts Intergouvernemental pour
<b>GIWA</b>	: Global International Waters Assessment (section de l'ONU chargée de l'Évaluation globale des eaux internationales)
<b>GPS</b>	: Global Positioning System
<b>IPCC</b>	: International Panel on Climate Change
<b>IRD</b>	: Institut de Recherche pour le Développement
<b>ISRA</b>	: Institut Sénégalaise de Recherche Agricole
<b>MNT</b>	: Modèle Numérique de Terrain
<b>Nbre. cit.</b>	: Nombre de citation
<b>Obs. / OBS.</b>	: Observations
<b>ODD</b>	: Objectifs de Développement Durable
<b>OMS / WHO</b>	: Organisation Mondiale pour la Santé
<b>ORSTOM</b>	: Office de Recherche Scientifique et technologique d'Outre-Mer
<b>SODEFITEX</b>	: Société de Développement des Fibres et Textiles
<b>SOTER</b>	: Base de données numérique sur les Sols et le Terrain
<b>SPEI</b>	: Indice Standardisé de Précipitation et d'Evapotranspiration
<b>UASZ</b>	: Université Assane Seck de Ziguinchor
<b>UCAD</b>	: Université Cheikh Anta Diop de Dakar

## Résumé

---

Situé au sud-est du Sénégal, plus précisément dans la région de Tambacounda, le bassin du Niaoulé est un espace très dynamique à cause de la croissance démographique adossée à un foisonnement des activités socioéconomiques. La péjoration climatique des années 1970 affectant tout le Sénégal a occasionné la diminution des ressources en eau de surface et souterraines. D'où l'objet principal de cette présente étude qui cherche à comprendre les impacts de l'évolution des ressources en eau sur les activités socioéconomiques.

La méthodologie de recherche est fondée sur une analyse essentiellement statistique combinant des données climatologiques (pluie, vent, température, insolation, évaporation et humidité relative), hydrologiques (débits journaliers) et socioéconomiques (enquêtes et entretiens). Nous avons également eu recours à des données spatiales pour les besoins de la cartographie.

L'analyse des SPEI a révélé que malgré un retour de la pluviométrie à la normale à partir des années 2000, les ressources en eau du bassin continuent à subir les impacts de la sécheresse climatique qui se traduisent par une réduction des disponibilités en eaux de surface et souterraines. Dès lors, les activités socioéconomiques qui se développent dans le bassin du Niaoulé, donnant lieu à des usages liés aux ressources en eau, sont également perturbées.

Les activités agricoles sont devenues incertaines avec la défaillance du système de production induite par la réduction de la durée de l'activité (50,9% selon les résultats d'enquête) conjuguée à la baisse de la qualité des produits récoltés (76,1% des résultats d'enquêtes). L'élevage est bouleversé par la réduction du potentiel fourrager et la difficulté de l'abreuvement des animaux (73,1% selon les résultats d'enquêtes). Les activités de pêche sont de plus en plus abandonnées (89,7% selon les résultats d'enquêtes) et le poisson se fait rare dans le bassin du Niaoulé. La ripisylve s'est dégradée emportant certains arbres fruitiers dont les produits étaient souvent consommés par les habitants du bassin. Pour pallier à cela, quelques stratégies ont été mises en œuvre. Toutefois, elles sont limitées par une insuffisance de moyens techniques et financiers.

**Mots clés :** Bassin versant, Niaoulé, Impacts, Ressources en eau, Variabilité climatique, Dynamique hydrologique.

## Abstract

---

Located in the south-east of Senegal, more precisely in Tambacounda's region, Niaoulé's basin is a very dynamic area because of population growth backed by an abundance of socioeconomic activities. The climatic deterioration of the 1970s affecting all of Senegal caused the decrease in surface and underground water resources. Hence, the main purpose of this present study, which seeks to understand the impacts of changes in water resources on socioeconomic activities.

The research methodology is essentially based on statistical analysis combining climatological (rain, wind, temperature, insolation, evaporation and relative humidity), hydrological (daily flows) and socioeconomic data (surveys and interviews). We also used spatial data for mapping purposes.

The SPEI analysis revealed that despite a return of rainfall to normal from 2000 onwards, the basin's water resources continue to suffer the impacts of climatic drought that result in a reduction of the availability of surface and underground water. Consequently, the socioeconomic activities that develop in the Niaoulé's basin, giving rise to uses linked to water resources, are also disrupted.

Agricultural activities become uncertain with the failure of the production system induced by the reduction of activity's duration (50.9% according to the survey results) combined with the drop in the quality of the harvested products (76.1 % of survey results). The breeding is upset by the reduction of fodder potential and the difficulty of watering the animals (73.1% according to the results of surveys). Fishing activities are increasingly abandoned (89.7% according to survey results) and fish are scarce in the Niaoulé basin. The riparian forest has deteriorated, sweeping away few fruit trees which products were often consumed by the inhabitants of the basin. To overcome this, a few strategies have been implemented. However, they are limited by insufficient technical and financial resources.

**Keywords:** Watershed, Niaoulé, Impacts, Water resources, Climate variability, Hydrological dynamics.

## Sommaire

---

Dédicaces .....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Abstract .....	iv
Sigles et abréviations.....	v
Introduction .....	vi
PREMIERE PARTIE : CADRE PHYSIQUE DU BASSIN DU NIAOULE .....	21
Chapitre 1 : Le milieu et les facteurs stables de l'écoulement du bassin versant du Niaoulé..	22
Chapitre 2 : Le climat et sa variabilité dans le bassin du Niaoulé.....	36
DEUXIEME PARTIE : ÉCOULEMENT ET DISPONIBILITE EN EAU DU BASSIN VERSANT DU NIAOULE.....	51
Chapitre 3 : Le régime hydrologique et sa variabilité dans le bassin du Niaoulé .....	52
Chapitre 4 : Bilan hydrologique et disponibilités en eau dans le bassin du Niaoulé .....	71
TROISIEME PARTIE : USAGES DE L'EAU ET IMPACTS DE LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES EN EAU SUR LES ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU NIAOULE.....	83
Chapitre 5 : Les ressources en eau et leurs usages dans le bassin du Niaoulé .....	84
Chapitre 6 : Les impacts de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio- économiques et les stratégies d'adaptation dans le bassin versant du Niaoulé.....	102
Conclusion générale .....	117
Références bibliographiques .....	119
Webographie .....	128
Annexes.....	I



## Introduction

---

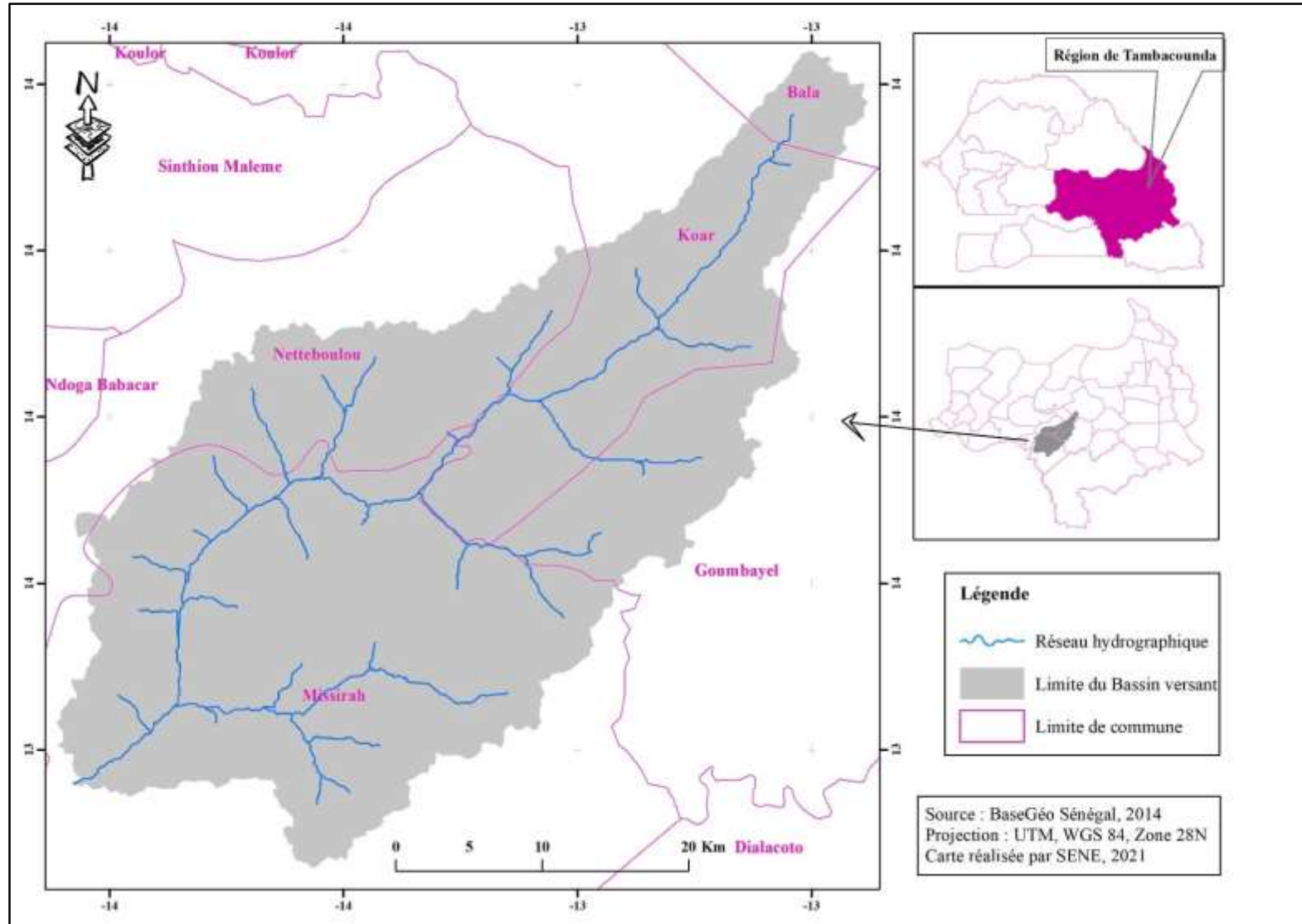
La connaissance des potentialités hydriques demeure une nécessité pour la maîtrise et la bonne gestion des ressources en eau par les sociétés. L'eau est une denrée essentielle dont dépend toute vie sur terre. Son usage est inextricablement lié au développement des activités humaines. De nos jours, la quantité des ressources en eau est limitée et leur qualité est menacée (Diop et Rekacewicz, 2003). Cette situation, associée aux besoins accrus en eau, constitue la principale préoccupation dans plusieurs pays en voie de développement.

Dans un bassin versant, le développement des activités humaines nécessite une gestion efficace des ressources en eau (Faye, 2013). Ainsi, pour aboutir à un développement qui est socialement équitable, économiquement efficace et écologiquement vivable, il faudrait une gestion intégrée des ressources en eau. De ce fait, trois pôles doivent être pris en considération au niveau du bassin versant : le milieu physique, les fonctions et, les valeurs et usages de la ressource. Ces derniers s'identifient à la lumière de cette présente étude qui est scindée en trois parties à savoir :

- ✓ la première partie qui présente le cadre physique du bassin ;
- ✓ la deuxième partie qui analyse l'écoulement et les disponibilités en eau et;
- ✓ la troisième partie qui souligne les usages et les impacts socioéconomiques.

Ce travail s'inscrit ainsi dans une logique de contribution à la résolution des préoccupations d'ordre sociale et économique liés à l'eau dans l'étendue du territoire sénégalais.

Le territoire sénégalais concentre l'essentiel des affluents du fleuve Gambie soit 71% de la superficie total du bassin (Sow, 2007). Parmi ces affluents, figure le Niaoulé qui se situe sur la rive droite. Son bassin versant s'étend entre les latitudes 13°24' et 13°54' N et entre les longitudes 13°12' et 13°44' W. Il couvre une superficie de 1 356 km<sup>2</sup>, soit 1,76 % du bassin de la Gambie qui s'étale sur 77 054 km<sup>2</sup> (Konaté, 1998 ; Sow, 2006). Situé dans la région de Tambacounda, le bassin du Niaoulé est partagé par cinq communes. Il s'agit des communes de Missirah, Netteboulou, Goumbayel, Koar et Bala (carte 1).



**Carte 1:** Carte de localisation du bassin du Niaoulé

## **1. Problématique**

### **1.1.Contexte**

Depuis les années 1970, la partie sahélienne de l'Afrique occidentale est affectée par une altération des conditions climatiques (Olivry, 1993 ; Orange *et al.*, 1997) qui laisse entrevoir une importante sécheresse observée entre la fin des années 1960 et la fin des années 1990. Cette sécheresse est suivie par une période de retour des pluies (Buontempo *et al.*, 2010). Cette situation a entraîné une baisse importante des écoulements et des réserves d'eau souterraine (Mahé *et al.*, 2000). En effet, cette variation des conditions climatiques est amplifiée par le réchauffement planétaire (Shanahan *et al.*, 2009). Le changement climatique peut se traduire par une augmentation significative des températures de surfaces et des précipitations au-dessus des continents (Folland et Karl, 2001), une intensification du cycle global de l'eau, des modifications du ruissellement et des débits des rivières, mais aussi de l'évaporation et l'évapotranspiration, de l'humidité des sols, de la couverture nuageuse, etc. Aussi, le changement climatique observé à l'échelle globale est à l'origine de nombreuses modifications dans la répartition et la distribution des paramètres climatiques et hydrologiques (Rossi, 2010). Cela influe donc sur les systèmes hydrologiques et leurs ressources en eau, que ce soit à l'échelle globale, régionale ou locale (Rossi, 2010). La baisse des précipitations est corolaire à une chute de l'écoulement moyen qui est deux fois plus important que le taux de perte des précipitations (Anderson *et al.*, 2005). De plus, l'étude des effets de la variabilité climatique qui est corolaire à la dynamique hydrologique, sur les activités socio-économiques, est d'un intérêt certain dans la mesure où les productions agricoles et la productivité des activités pastorales dépendent largement des conditions climatiques (Sané, 2003).

La pénalisation de nombreux projets de développement peut découler de l'altération des ressources hydriques qui se traduit par une perturbation de la qualité et la quantité des ressources en eau. L'écoulement réduit peut engendrer non seulement une diminution de l'approvisionnement en eau des individus et des systèmes naturels (FAO, 2009), mais aussi la migration de certaines communautés. La chute de la pluviométrie conjuguée au réchauffement thermique peut entraîner la réduction des potentialités de production des terres affectant du coup les conditions de vie des populations. De plus, les formes extrêmes de l'écoulement ont des impacts négatifs sur les activités socioéconomiques telles que l'agriculture (GIWA, 2004).

Le bassin du fleuve Gambie se situe dans cette partie sahélienne de l’Afrique de l’Ouest. En effet, les années sèches qu’a connues l’ensemble du bassin de la Gambie des années 70 ont causé de profondes modifications dans les stratégies paysannes à l’instar de l’introduction de plantes à cycle court pour qu’elles puissent bénéficier de la quantité d’eau nécessaire à leur cycle végétatif ; la recherche de zones plus adaptées aux cultures liées à leurs conditions hydriques favorables (Konaté, 1998).

## **1.2. Justification**

La question de l’eau est devenue une des préoccupations majeures au Sénégal. Elle est associée, de façon spécifique, à une panoplie d’interrogations relatives à la rareté et au caractère aléatoire des pluies, la dégradation de la qualité des ressources en eau, les conflits occasionnés par l’exploitation de l’eau, le problème d’accès à la ressource en eau entre les zones, le développement des différentes activités socio-économiques (DGPRE, 2007). Ces dernières constituent autant d’enjeux auxquels le secteur de l’eau est confronté. La pérennisation des dynamiques de développement national nécessite une gestion efficace des ressources en eau (DGPRE et PEPAM, 2014). Ainsi, pour aboutir à cette gestion, il est nécessaire de connaître la ressource et la maîtriser. Ce qui constitue un enjeu majeur pour le XXI<sup>ème</sup> siècle auquel les scientifiques doivent répondre afin de passer à de nouvelles formes de gestion de l’eau, pour l’atteinte des Objectifs de Développement Durable (ODD) notamment l’objectif 6.

Le choix de la thématique de recherche n’est pas fortuit. D’abord, la question de l’eau occupe une place prépondérante dans le développement d’une entité spatiale. Dans notre pays (le Sénégal), les coupures d’eau sont très fréquentes dans les zones urbaines ; alors que le milieu rural est confronté à un problème d’accessibilité. Cela a pendant longtemps soulevé des inquiétudes relatives à la disponibilité des ressources en eau en rapport avec la vie des hommes. Ensuite, les enseignements en hydrologie suivie pendant notre 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année universitaire nous ont poussés à nous intéresser davantage à la problématique de l’eau. Aussi, une bonne connaissance des facteurs climatiques (la pluie et la température) et de l’accessibilité aux eaux de surface qui en résultent est nécessaire pour comprendre le contexte de l’évolution socio-économique d’une zone (Magrin et Montclos, 2018).

Le choix du bassin du Niaoulé (Tambacounda) a été fondé sur le fait qu’il reflète l’essentiel des caractéristiques physiques du bassin de la Gambie et constitue un des sites suffisamment

représentatifs et facilement accessible à l'échelle du bassin de la Gambie (Konaté, 1998). Aussi, avec la couverture de *Google earth* et la documentation existante, nous avons pu noter l'existence d'activités socio-économiques liées à l'eau du Niaoulé. Ainsi, il nous semble pertinent de montrer les effets de l'évolution des ressources sur les activités socio-économiques afin de permettre aux différents usagers de l'eau de trouver une meilleure alternative pour gérer l'eau aussi longtemps que possible dans le but de la satisfaction de leurs besoins.

Ce travail d'étude et de recherche constituera notre modeste contribution à une meilleure connaissance des potentialités en eau dans le Sud-Est du Sénégal et de la dynamique actuelle pour une meilleure gestion des ressources en eau. Il contribuerait également à répondre aux préoccupations de la population locale tant pour le développement de leurs activités socio-économiques que pour leur devenir.

### **1.3. Questions de recherche**

Notre problématique de recherche s'articule autour d'une question principale : comment l'évolution des ressources hydriques impacte-t-elle sur les activités socio-économiques ? Cette question principale est déclinée en trois questions spécifiques à savoir : Comment la pluviométrie a-t-elle évolué dans le bassin versant du Niaoulé ? Comment est la dynamique hydrologique du Niaoulé ? Quels sont les impacts de l'évolution des ressources en eau du bassin versant du Niaoulé sur les activités socio-économiques ? Cette batterie de questions guidera notre réflexion dans le cadre de la réalisation de cette étude.

### **1.4. Objectifs de recherche**

L'objectif général de cette étude est de comprendre les effets de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio-économiques. De manière spécifique, il s'agit :

- ✓ d'analyser l'évolution de la pluviométrie dans le bassin versant du Niaoulé ;
- ✓ d'examiner la dynamique hydrologique dans le bassin versant du Niaoulé ;
- ✓ de déterminer les impacts de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio-économiques dans le bassin versant du Niaoulé.

## **1.5.Hypothèses de recherche**

Pour l'atteinte des objectifs fixés, des hypothèses ont été avancées. Dans cette étude, l'hypothèse générale atteste que la dynamique hydrologique a entraîné une baisse des activités socio-économiques dans le bassin versant du Niaoulé. Aussi, une hypothèse spécifique est retenue pour chaque objectif spécifique :

- ✓ L'évolution de la pluviométrie dans le bassin versant du Niaoulé est caractérisé par une diminution ;
- ✓ la diminution de la pluviométrie entraîne la baisse de la disponibilité des eaux de surface et celles souterraines ;
- ✓ la diminution des ressources en eau dans le bassin versant du Niaoulé est à l'origine du recul des activités socio-économiques ;

## **2. Analyse conceptuelle**

### **2.1.Impacts**

Le Petit Larousse illustré (2007) définit l'impact comme étant l'influence de quelqu'un ou de quelque chose sur le déroulement de l'histoire, des événements. Il s'agit de l'effet produit par quelque chose ; l'influence qui en résulte. Ainsi, cet effet peut être positif ou négatif. L'effet est positif dans le cas où celui-ci apporte un plus sur le précédent que l'on juge non conforme aux besoins ; alors que l'effet est négatif dans le cas où celui-ci freine l'amélioration du précédent malgré son apport. Par extension, le mot est utilisé pour désigner les conséquences (éventuellement indirects et/ou différés dans l'espace et dans le temps) d'un événement, d'un processus, d'une activité (Kabengele, 2010). L'Institut Danois d'Études Internationales (2001) ajoute que l'impact d'une intervention donnée revient à se demander : qu'est-ce qui est sorti de tout ça ? L'évaluation d'impact se rapporte à la façon dont les interventions de développement influencent la situation socio-économique et politique d'une société et de l'ampleur de cette influence. Aussi, l'évaluation se rapporte à la compréhension, à l'analyse et à l'explication des processus et problèmes qui contribuent à provoquer le changement.

Dans le cadre de notre recherche, l'impact sera conçu comme un ensemble de conséquences issues des modifications de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio-économiques pratiquées par les habitants du bassin du Niaoulé.

## **2.2.Ressource en eau**

Le concept de ressource en eau a connu une évolution avec une diversité de définitions. D'après Charnay (2010), « une eau de surface ou souterraine ne devient ressource que s'il est possible techniquement, économiquement et écologiquement de l'exploiter tout en la maîtrisant et en la préservant ». En d'autres termes, il s'agit de l'eau dont dispose ou peut disposer un utilisateur ou un ensemble d'utilisateurs pour répondre à leurs besoins. Margat (1994) précise que même si la ressource en eau a bien le sens d'une offre, réelle ou potentielle, rencontrée par une demande en eau, il ne faut pas privilégier sa dimension quantitative et en négliger d'autres pouvant servir à la définir et à l'évaluer. De nos jours, les hydrologues ont souvent tendance à cerner le concept dans sa pluralité. Ainsi, les ressources en eau concernent les occurrences d'eau naturelle et plus particulièrement les eaux douces continentales d'autant plus que les eaux offertes aux utilisations humaines proviennent du milieu naturel. Chéret (1967) ajoute que « l'inégale répartition des pluies dans l'espace et dans le temps provoque des variations considérables des ressources en eau suivant les endroits ou les moments ». Alors, le concept de ressource en eau inclut la prise en vue des différents usages, voire leur utilisation in situ, mais renferme aussi des limites. La ressource en eau est ainsi indissociable de la conception de l'eau, à la fois comme bien économique et comme bien d'environnement (Faye, 2013). Dès lors, la définition du concept implique l'analyse du lien existant entre un hydrosystème et les activités humaines.

Dans le cadre de ce travail, la ressource en eau est conçue comme l'ensemble des eaux du bassin accessibles, utiles et disponibles pour l'homme et les écosystèmes. Elle renvoie à l'étude de la situation hydro-pluviométrique et leur relation avec l'espace et la société du bassin du Niaoulé.

## **2.3.Variabilité climatique**

La variabilité climatique peut être comprise comme étant la modification, dans l'espace ou dans le temps, du climat ou d'un paramètre climatique, par rapport à un état de référence défini sur la base d'une période de trente ans (Sané, 2003). Les différences entre les valeurs moyennes à long terme des paramètres climatiques (pluie, température, humidité, durée des saisons, etc.) et

les valeurs observées prises à différentes échelles temporelles et spatiales traduisent le degré de variabilité climatique (ENDA et CIAT, 2005). Pour se faciliter la tâche, certains auteurs associent la notion de variabilité climatique à celle du changement climatique. Ainsi, Niasse et *al.*, (2004) définissent la notion de variabilité et de changements climatiques comme la modification ou variation significative du climat, qu'elle soit naturelle ou due aux facteurs d'origine anthropique. Or, le GIEC (2014) considère le changement climatique comme une variation du climat à long terme due à des facteurs naturels ou anthropiques. En outre, la CCNUCC (1992) distingue les deux notions à travers la nature des facteurs. Ainsi, les changements climatiques sont attribués exclusivement aux activités humaines qui altèrent la composition de l'atmosphère ; alors que la variabilité du climat est imputable à des causes naturelles.

Dans notre étude, la variabilité climatique désignera une modification à court terme des paramètres du climat (pluie, température, humidité, durée des saisons, etc.) sur un lieu donné. Il s'agira de montrer les externalités de cette variabilité climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Niaoulé ; car, lorsque cette variabilité se traduit par de longues périodes de sécheresse ou d'excès d'eau, elle peut avoir des conséquences néfastes sur le cycle de l'eau (Faye, 2013).

#### **2.4.Dynamique hydrologique**

D'après Hypergé, encyclopédie électronique de Géographie en ligne, la dynamique peut être comprise comme un changement, ou devenir résultante d'un jeu de forces. Géoconfluences considère la dynamique comme un changement, une évolution et, par extension, la capacité à changer, à évoluer. Il montre aussi que la notion ne doit être interprétée uniquement en termes de croissance positive ; une dynamique peut être négative lorsqu'elle traduit le déclin, la déshérence, la déprise. La dynamique est également comprise comme une étude du changement (sous toutes ses formes) en relation avec les forces qui le causent et les formes d'énergie correspondantes (Bruno, 1999). Dès lors, nous retenons que la dynamique constitue l'évolution d'un phénomène dans le temps et dans l'espace sous l'effet combiné de facteurs ou forces pouvant être de diverses natures.

D'après Bruno (1999), toute approche dynamique du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant doit s'appuyer sur des considérations énergétiques. Rossi (2010) définit la dynamique



hydrologique comme l'ensemble des changements à long terme, oscillations et fluctuations des variables hydrologiques. Il s'agit là de caractériser l'évolution des paramètres hydrologiques au cours du temps (tendances, extrêmes, répartition annuelle...). De plus, Rossi (2010) ajoute que la réponse hydrologique des grands bassins versants intègre à la fois les variations du climat et les altérations liées aux activités humaines.

Dans le cadre de notre mémoire, nous allons emprunter la définition de Faye (2013). Il s'agit de l'ensemble des variations du débit du bassin du Niaoulé, en fonction de son extension, de la pluviométrie et du type d'aquifères déterminant les infiltrations et les relations avec les eaux de surface.

## **2.5. Bilan hydrologique**

À en croire le Vocabulaire de l'hydrologie et de la météorologie (1978), le bilan hydrologique correspond à l'« Expression exprimant la répartition des différents volumes d'eau compris dans chacune des parties du cycle de l'eau, pour une période et un bassin donnés. Le Grand Larousse encyclopédique, quant à elle considère le « bilan de l'écoulement ou bilan hydrologique » comme étant l'« état comparatif des pluies et des débits sur un bassin fluvial durant une période donnée (année, saison, averse) ». Le bilan hydrologique consiste alors l'« Estimation des entrées, des sorties et des variations de réserve d'une masse d'eau au cours d'une certaine période de temps » (WHO, 2012). Le Dictionnaire de la Géographie (1984) conçoit le « bilan hydrique ou hydrologique » comme une « Étude comparée de la lame d'eau tombée à la surface d'un territoire ou d'un bassin versant et les différentes formes de transfert de cette eau, soit par évapotranspiration, écoulement, infiltration et alimentation des nappes souterraines ».

Au terme de cette énumération de définitions relativement différentes, nous pouvons retenir que le bilan hydrologique vise à établir la différence entre les entrées et les sorties en eau d'une unité géographique, pendant une période de temps donné.

## **2.6. Bassin versant**

Le bassin versant est l'unité de base de l'hydrologue avec laquelle il pourra effectuer des bilans, analyser des processus, simuler les débits d'une rivière. Il s'agit d'un système correspondant à « une surface hydrologiquement close » (Musy A. et Higy C., 2004) ; c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou

s'écoulent par une seule section à l'exutoire. Il est ainsi caractérisé par sa limite (les lignes de partage des eaux), son organisation (la structure du réseau, etc.) et sa composition (Thibault, 1997).

Dans le cadre de notre travail, nous allons concevoir que le bassin versant ou bassin hydrographique est une portion de territoire délimitée par des lignes de crête (ou lignes de partage des eaux) et irriguée par un même réseau hydrographique ; autrement dit, à l'intérieur d'un même bassin, toutes les eaux reçues suivent, du fait du relief, une pente naturelle et se concentrent vers un même point de sortie appelé exutoire.

### **3. Méthodologie de recherche**

Dans ce travail, nous avons adopté une approche qui vise à mettre en évidence les interrelations entre les ressources en eau, le milieu et la société. La méthodologie est globalement constituée par la recherche bibliographique, la collecte des données climatiques, hydrométriques, spatiales et d'enquêtes, le traitement des données et leur analyse.

#### **3.1. La recherche bibliographique**

Constituant l'étape première de notre méthodologie, cette recherche bibliographique est fondée essentiellement sur des ouvrages, des rapports, des documents de thèses, articles, mémoires, des notices et des documents en ligne. Ces documents ont été consultés au niveau des bibliothèques universitaires (UASZ et UCAD), du centre de documentation de la DGPRES, des bibliothèques numériques (*bibnum-UCAD*, du campus francophone de l'UASZ), des plateformes en ligne telles que *Persée*, *Cybergéo*, *Open Édition*, *horizon documentation de l'IRD*, etc. Cette recherche bibliographique nous a permis d'avoir une vision synoptique sur les caractéristiques physiques, démographiques, socio-économiques de notre zone d'étude.

#### **3.2. Etat de l'art**

À l'instar de toute étude scientifique, il incombe de faire l'état des lieux de la production scientifique en fonction du thème étudié. Il s'agit là d'effectuer l'économie des travaux antérieurs relatifs à la dynamique hydro-pluviométrique dans le bassin du Niaoulé ainsi que les travaux pouvant servir d'appui pour notre travail. Pour cela, nous avons eu recours à la

recherche documentaire avec la consultation d'ouvrages généraux et spécifiques, mais aussi d'articles scientifiques.

De manière globale, le bassin du fleuve Gambie, dans lequel se trouve notre zone d'étude, a fait l'objet de plusieurs études. Ces dernières sont d'une importance capitale pour l'aboutissement de notre travail de recherche dans la mesure où ils nous servent de référence. Ces travaux ont été axés sur l'hydrologie, la climatologie, la géomorphologie, la géologie, entre autres. Ainsi, nous avons pu relever quelques travaux qui sont en phase avec notre thématique de recherche.

S'intéressant aux écoulements et aux indices de sécheresse dans le Bassin du Niokolo-Koba, Sow (1988), montre que l'impact de la sécheresse dans le bassin se solde par une diminution de la pluviométrie. De plus, l'auteur établit le lien existant entre la sécheresse climatique et celle hydrologique dont la plus importante manifestation reste l'arrêt de l'écoulement. Il souligne également la conformité de ce régime hydrologique à celui pluviométrique et montre que les indices de sécheresse hydrologique sont en corrélation avec la péjoration pluviométrique.

Dione (1997), dans thèse intitulée « évolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie », a analysé l'évolution de la pluviométrie dans l'espace et dans le temps avec la baisse généralisée de la pluie dans toute la zone du fait de la sécheresse. De plus, il a montré la relation pluie-écoulement et a déterminé les ressources en eau de surface dans un contexte de péjoration pluviométrique. L'auteur a également classé notre zone d'étude dans le domaine soudanien.

Dans son mémoire portant sur les « sécheresses climatiques et les étiages fluviaux au Sud-Est du Sénégal oriental », Sougou (1996) révèle que l'évolution climatique est marquée par une baisse des précipitations. Il souligne que cette péjoration du climat accentue les étiages fluviaux soutenus par les faibles réserves souterraines du socle.

Dans un autre mémoire traitant des disponibilités en eau dans le Sud-est du Sénégal, Labou (1996), propose une évaluation des disponibilités en eau basée sur une classification de ces dernières en trois catégories à savoir les eaux de pluie, les eaux de surface et les eaux souterraines. Ses résultats indiquent une abondance de la pluviométrie dans le Sud et sa baisse progressive vers le Nord dans la partie Sud-Est du Sénégal, la faiblesse des eaux souterraines et l'importance des eaux de surface qui contribuent à 27 % du fleuve Sénégal.

Dans sa thèse intitulée « Les Bas-fonds dans le réseau hydrographique du fleuve Gambie : Cartographie, Régime hydrologique, Valorisation agricole et Typologie », Konaté (1998) s'est donné comme objectif de chercher une méthode de gestion des potentialités naturelles offertes par les bas-fonds. Selon lui, cette méthode devrait permettre d'améliorer la connaissance du fonctionnement des bas-fonds dans le bassin de la Gambie, de mettre en évidence des critères pertinents pour une classification des bas-fonds du bassin et de montrer la pertinence d'un certain nombre d'aménagements. Ainsi, il a choisi deux sous-bassins représentatifs du bassin de la Gambie parmi lesquels, le Niaoulé, notre zone d'étude a été choisie. D'après lui, les deux bassins sont choisis de telles sortes qu'ils reflètent l'essentiel des caractéristiques physiques de la Gambie et le Niaoulé est sélectionné pour servir de modèle à la caractérisation des bas-fonds du continental terminal.

Dans sa thèse de doctorat d'État, Sow (2007) s'est intéressé à l'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses confins Guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé. Dans cette étude, l'auteur souligne l'impact des déficits pluviométriques sur l'écoulement des bassins de la Gambie et de la Falémé. Il détecte une rupture dans les séries pluviométriques en 1969, caractérise les déficits pluviométriques et confirme l'existence d'une péjoration climatique sur la période 1970-1990. L'auteur a aussi analysé le régime des cours d'eau et a indiqué les grandes disponibilités en eau de surface sur les bassins, avec 80 à 90 % écoulés en 3 ou 4 mois. Il montre également la vulnérabilité des bassins induits par la sévérité des étiages dans tous les domaines climatiques et propose enfin leur gestion et aménagement pour une éventuelle satisfaction les usagers par année.

Dans son article intitulé « Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie (Bassin continental Guinéo-Sénégalais) », Faye (2018a) analyse la corrélation entre des paramètres morphométriques et leur influence sur l'hydrologie du bassin versant de la Gambie. Avec l'Analyse en Composante Principale (ACP), l'auteur a montré que malgré la taille des données (14 unités de bassins et 15 variables de paramètres), on peut obtenir un résumé et une vue complète des relations existantes entre les paramètres morphométriques des bassins versants étudiés. De plus, l'auteur souligne que la combinaison du facteur de forme (KG) et de la fréquence des affluents peut permettre l'estimation du ruissellement dans le bassin. Aussi, la longueur du bassin participe à la détermination du débit écoulé dans le bassin, d'où sa bonne corrélation. Il avance aussi que l'utilisation seule du débit moyen écoulé pour déterminer cette corrélation reste insuffisante

comme méthode et ne permet d'assurer la robustesse d'un tel modèle même si la variabilité du relief a un impact important sur l'écoulement.

En s'intéressant de plus près au Niaoulé à travers son article intitulé « le Niaoulé et son bassin versant : étude hydrologique », Sow (2006) analyse à travers le régime moyen et la variabilité et l'écoulement journalier, les facteurs qui déterminent les modalités de l'écoulement fluvial dans le bassin du Niaoulé. Pour lui, l'écoulement est caractérisé par sa brièveté, allant jusqu'à l'arrêt total pendant de nombreux jours durant l'année. En effet, son analyse montre que malgré une pluviométrie relativement abondante (environ 800 mm/an), l'écoulement connaît des débits très faibles avec plusieurs mois, dans l'année hydrologique, qui enregistrent un nombre très important de jours marqués par l'arrêt total de l'écoulement, témoin de la sévérité des étiages.

Dans le mémoire intitulé écoulement dans le bassin versant du Niaoulé, Sow (2008), met en évidence la faiblesse des disponibilités en eau de surface dans le bassin du Niaoulé. Ainsi, il apparaît clairement dans son étude que malgré l'importance de la pluviométrie et la géologie du bassin qui est favorable à la recharge des nappes souterraines et le soutien des étiages, la durée de l'écoulement ainsi que les disponibilités en eau de surfaces sont réduites. En effet, la synthèse des facteurs de l'écoulement du bassin du Niaoulé laisse entrevoir un relief qui favorise les pertes par évaporation du fait de sa configuration, une végétation constituée essentiellement de savane favorisant ainsi l'évapotranspiration, une présence de lithosols sur cuirasses combinés à la faiblesse des pentes contribuant donc à réduire la lame d'eau écoulée et enfin, une température moyenne annuelle de 29°C à Tambacounda donnant lieu à une évaporation très élevée. De plus l'auteur souligne qu'avec la sécheresse, l'Evapotranspiration relative (ETR) a la proportion la plus importante, ce qui constitue un obstacle pour le soutien des étiages. Enfin, le régime pluviométrique est corolaire à l'abondance moyenne et au régime hydrologique du bassin du Niaoulé.

Au regard de ces travaux qui se sont intéressés au Niaoulé, les incidences de l'évolution des ressources en eau sur les activités socio-économiques ne sont pas étudiées. Lors de notre recherche bibliographique, nous avons constaté que les effets de la dynamique hydrologique sur les activités socio-économiques dans un bassin versant ont été légèrement évoqués. Cet état de fait nous amène déjà à nous intéresser non seulement à la réactualisation des données dans un premier temps, l'identification des usages de l'eau, mais également la mise en exergue des impacts de la variabilité hydroclimatique sur les activités socio-économiques dans un bassin

versant. Nonobstant ces travaux précités, d'autres recherches portant sur la thématique de recherche, d'une manière générale, nous ont également intéressés.

C'est le cas de l'étude menée par Mahé et Olivry (1995) sur la variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. Dans cette étude, les auteurs ont montré que la variabilité des précipitations et des écoulements en Afrique occidentale et centrale sont liées aux flux d'humidité associés à la mousson et à l'alizé maritime de l'Atlantique. Ils ont aussi montré qu'au-delà d'une réponse annuelle immédiate de l'écoulement des cours d'eau à une saison des pluies déficitaire, une certaine durabilité du déficit hydrologique devrait être imputée à l'effet cumulé des longues années de sécheresse. De plus, ils distinguent la phase sèche des années 70 et 80, des précédentes par sa persistance, son extension et son intensité.

Dans un autre article intitulé « Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (Mali) : Gestion intégrée des zones inondables tropicales », Mahé et *al.*, (2000), ont essayé de cartographier les variations spatio-temporelles des paramètres météorologiques mais aussi de les confronter à la dynamique des écoulements observés dans le delta intérieur du Niger pour en déduire son fonctionnement hydrologique.

S'intéressait aux enjeux et stratégies de l'eau pour un développement durable dans leur article, Kettab et *al.*, (2008), montrent combien l'eau est une ressource indispensable pour le développement d'un pays et constitue à la fois un enjeu majeur, un défi futur à relever et un espoir de mieux-être et de progrès. De plus, ils précisent que la maîtrise de l'eau est d'une importance capitale dans l'économie d'un pays ; elle est assez complexe, difficile, mais permet de définir une stratégie, une politique et une vision.

Dans sa thèse, Faye (2013) a établi le bilan hydrologique de l'écoulement pour quantifier les ressources en eau disponibles en vue de leur planification et de leur gestion dans un contexte de variabilité hydroclimatique. Il souligne que le fonctionnement hydrologique du bassin de la Falémé s'inscrit dans un contexte de déficit et de variabilité hydroclimatique qui se traduit par la hausse des températures, de l'insolation et de l'évaporation consécutivement à la diminution de l'humidité relative et des totaux pluviométriques. L'auteur a aussi proposé une Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) avec la révision du cadre réglementaire et institutionnel du secteur de l'eau et le changement profond des mentalités des acteurs et usagers.

Dans leur article intitulé « Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés », Faye et *al.*, (2015) ont montré une diminution de l'écoulement (depuis 1971) suivi d'une augmentation de ce dernier (depuis 1993) liée à la variabilité de la pluviométrie dans le bassin versant du fleuve Sénégal. Les auteurs soulignent des ruptures notées au niveau des coefficients d'écoulement et révèlent que les opérations de gestion du barrage ont entraîné un laminage des crues conduisant à la modification du régime hydrologique.

### **3.3.Les données climatiques : collecte et traitement**

Les données climatiques ont été recueillies au niveau de l'ANACIM. Elles sont fournies au pas de temps mensuel et concernent les paramètres climatiques de la station synoptique de Tambacounda à savoir la pluviométrie, les vents, la température, l'évaporation et l'humidité relative. La série de données s'étend de 1951 à 2020 soit une durée de 70 ans. Ce choix se justifie par le fait que la série prend en compte une période dite humide (avant 1976), celle dite qui commence à partir de 1976. Néanmoins, la série de données reçues est truffée de manquements qui sont dus aux pannes des appareils de mesure ou l'absence d'enregistrement. Pour traiter ces données, nous avons utilisé les logiciels Excel et XLSTAT. Ainsi, les traitements statistiques effectués avec ces données nous ont permis d'obtenir les moyennes, les coefficients de variations, les écarts, les fréquences, selon le paramètre climatique concerné. De plus les résultats obtenus de ces traitements ont été traduits sous forme de représentation graphique ou de tableaux.

### **3.4.Les données hydrométriques : collecte et traitement**

Le bassin du Niaoulé n'est équipé que d'une seule station hydrométrique à savoir celle de Niaoulé-Tanou. Cette station est gérée par la DGPRE. Les mesures ont été traduites en débits à partir de 1970. La série de données s'étend sur une durée de 24 ans d'observations (de 1970 à 1993). Toutefois, la série révèle quelques années lacunaires qui sont dues à des pannes de l'appareil de mesure ou à l'absence de jaugeages. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous avons omis ces années lacunaires dans le traitement. Nous avons donc travaillé uniquement sur la période de 13 ans (de 1971 à 1986). Les données de SPEI ont été utilisées pour estimer le comportement hydrologique actuel du bassin. Fondé uniquement sur la statistique, le traitement

des données hydrométriques a été effectué avec les logiciels Excel et XLSTAT. Cela nous a permis de calculer les débits moyens mensuels et annuels, l'hydraulicité, la fréquence des Dmax et des Dmin, les coefficients de variation, les écarts .... Nous avons également traduit les résultats issus des traitements sous la forme de tableaux ou de graphique.

### **3.5. Les données spatiales : collecte et traitement**

Les données spatiales proviennent de différentes sources à savoir : *BaseGéo Sénégal (2014)*, *SOTER (2009)*, *CSE (2015)* et *Google earth pro (2021)*. Nous avons utilisé dans un premier temps un MNT que nous avons téléchargé dans le site <https://basegeo.sec.gouv.sn/>. Le MNT nous a permis, à travers le logiciel ArcMap 10.5, de délimiter le bassin, mais également d'élaborer la carte altimétrique du bassin avec des intervalles d'altitudes. À partir des résultats obtenus, nous avons pu, avec Excel, établir la courbe hypsométrique du bassin. L'usage de la limite du bassin sur toutes les cartes justifie la présence de cette source. Les données de SOTER (2009) nous ont permis de réaliser la carte des sols du bassin. Elles correspondent parfaitement à celles utilisées dans certains travaux antérieurs en comparaison avec les données de l'institut de géologie du Sénégal. Les données du CSE (2015) ont été aussi utilisées pour déterminer les communes ainsi que les localités situées à l'intérieur du bassin. Enfin, nous avons utilisé les données de *Google Earth Pro (2021)* pour confectionner la carte du paysage agraire de la localité de Missirah. En effet, nous avons d'abord effectué une capture de l'image correspondant, ensuite nous l'avons géoréférencé avant de la numériser sur ArcMap 10.5.

### **3.6. Les travaux de terrain**

Ils reposent essentiellement sur les observations directes effectuées sur le terrain et les investigations réalisées sur la base d'un questionnaire ou d'un guide d'entretien.

#### **✓ Les observations directes sur le terrain**

Elles nous ont permis de mieux comprendre une bonne partie de la théorie sur les facteurs stables du bassin. Ces observations ont été également accompagnées de relevés GPS et de photos qui nous ont servi d'éléments de vérification et d'illustration.

#### **✓ Les investigations**

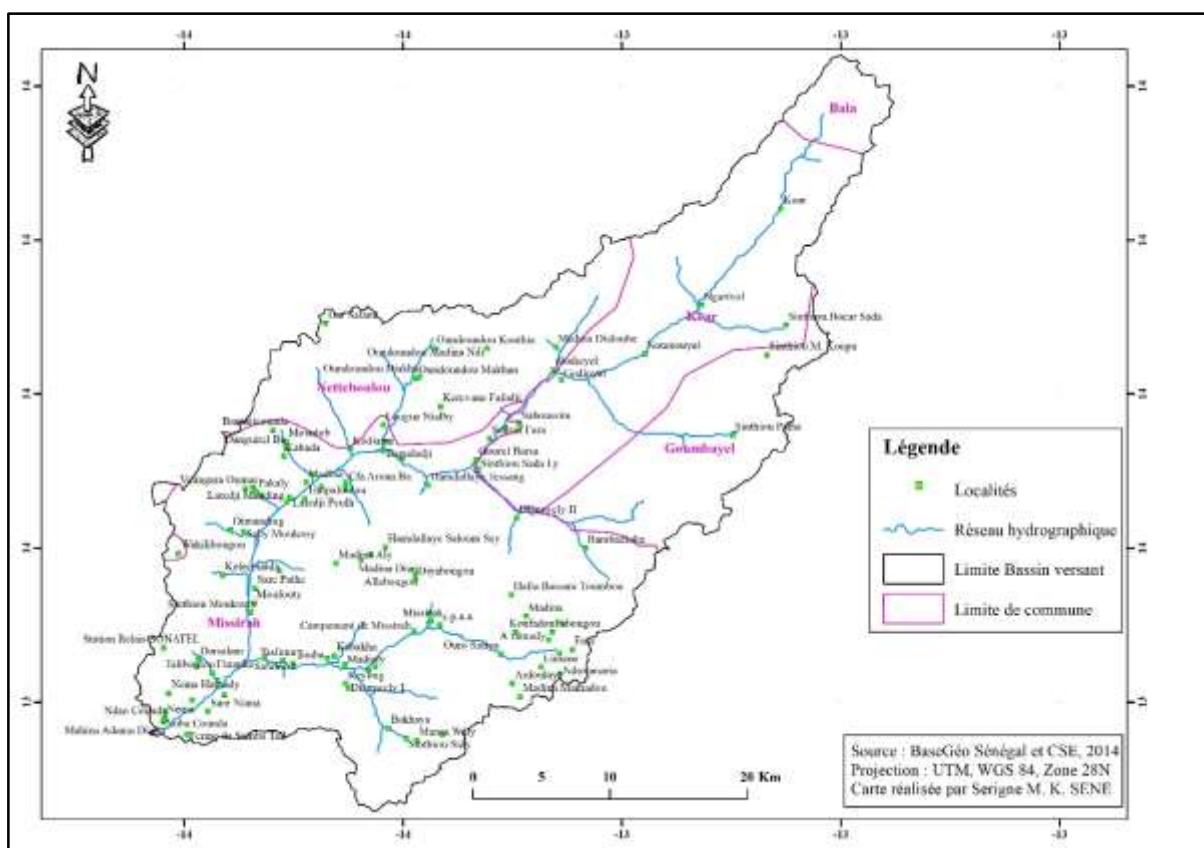
Il s'agit de la collecte d'informations sur la situation socio-économique du bassin sur la base d'un questionnaire ou d'un guide d'entretien. Le guide d'entretien est un outil de collecte de



données qualitatives permettant de compléter les informations recueillies pendant les enquêtes. Il est adressé aux personnes ressources. Le questionnaire nous a fourni des données quantitatives. Il obéit à un échantillonnage.

### ✓ L'échantillon

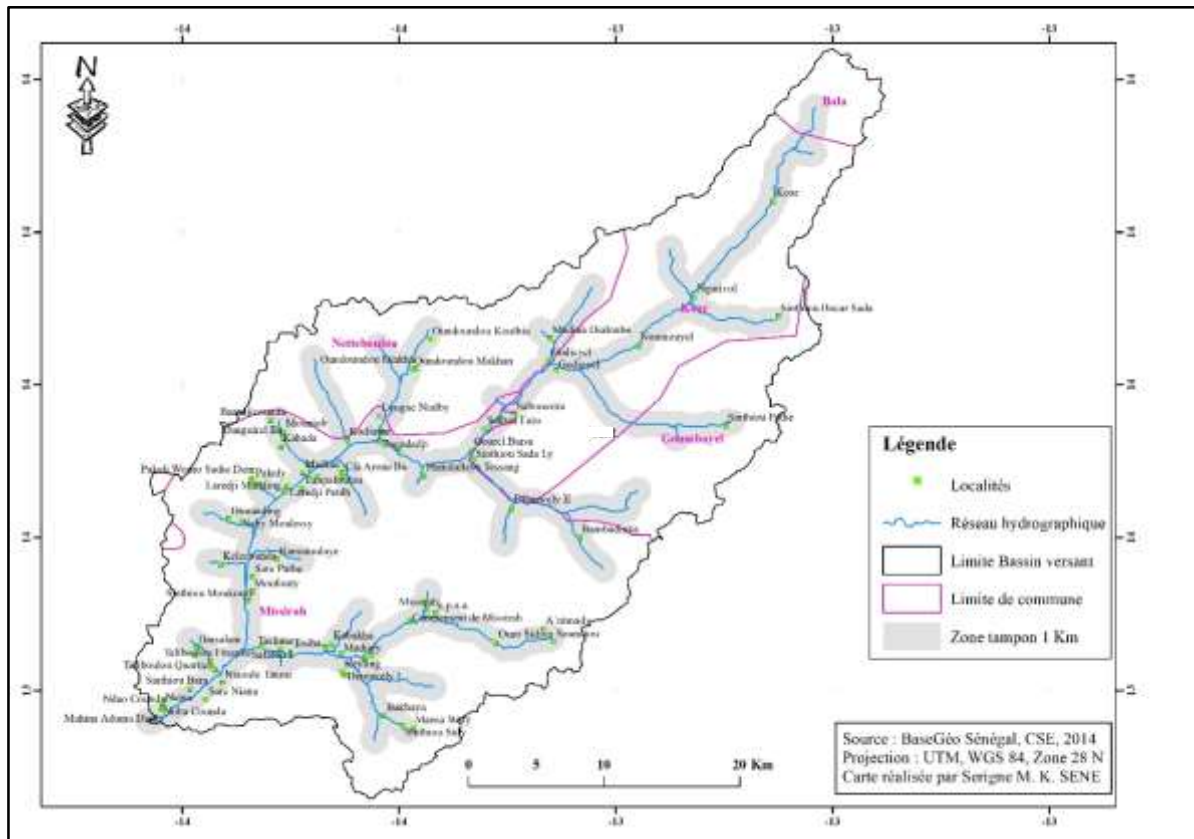
Les données d'enquêtes sur la situation socio-économique des populations dans le bassin versant sont collectées par la méthode d'échantillonnage aléatoire simple. Le bassin versant du Niaoulé est compris entre 5 communes à savoir Missirah, Koar, Netteboulou, Goumbayel et Bala. Il couvre plus de cent (100) localités réparties dans les cinq communes (carte 2).



**Carte 2 :** Localités situées dans le bassin versant du Niaoulé

Pour réaliser les enquêtes, les villages ou quartiers ont été choisis en réalisant, dans un premier temps, une zone tampon couvrant 1 Km de part et d'autre du réseau hydrographique. Ce choix n'est pas fortuit, car d'après l'OMS, un des critères d'accessibilité à l'eau pour des usages domestiques est basé sur la distance par rapport à la source qui doit être au maximum 1 Km. Ainsi, nous avons obtenu 49 localités situées entre 0 et 1 Km du cours d'eau. Ces dernières sont

réparties comme suit : une localité pour la commune de Goumbayel, 5 pour la commune de Koar, 38 pour Missirah, et 5 pour la commune de Netteboulou (carte 3).



**Carte 3:** Localités situées dans la zone tampon de 1 Km

Le nombre élevé de ménages pour les 49 localités (1881) nous ont amenés à réduire davantage la taille de l'échantillon. C'est ainsi que nous nous sommes limités à la commune de Missirah dans laquelle nous avons choisi 9 localités sur la base du critère de voisinage par rapport au réseau hydrographique conjugué à l'importance de la taille des ménages.

Le questionnaire a concerné donc 9 localités sur un total de 102 situés dans le périmètre du bassin du Niaoulé (carte 4). L'unité de référence choisie est le ménage. Ainsi, nous avons interrogé 172 chefs de ménages sur un total de 1146 pour l'ensemble des 9 localités situées dans la zone tampon. Le taux de sondage global est de 15 % (tableau 1). Ainsi, le nombre de personnes interrogées a été déterminé par la formule suivante :

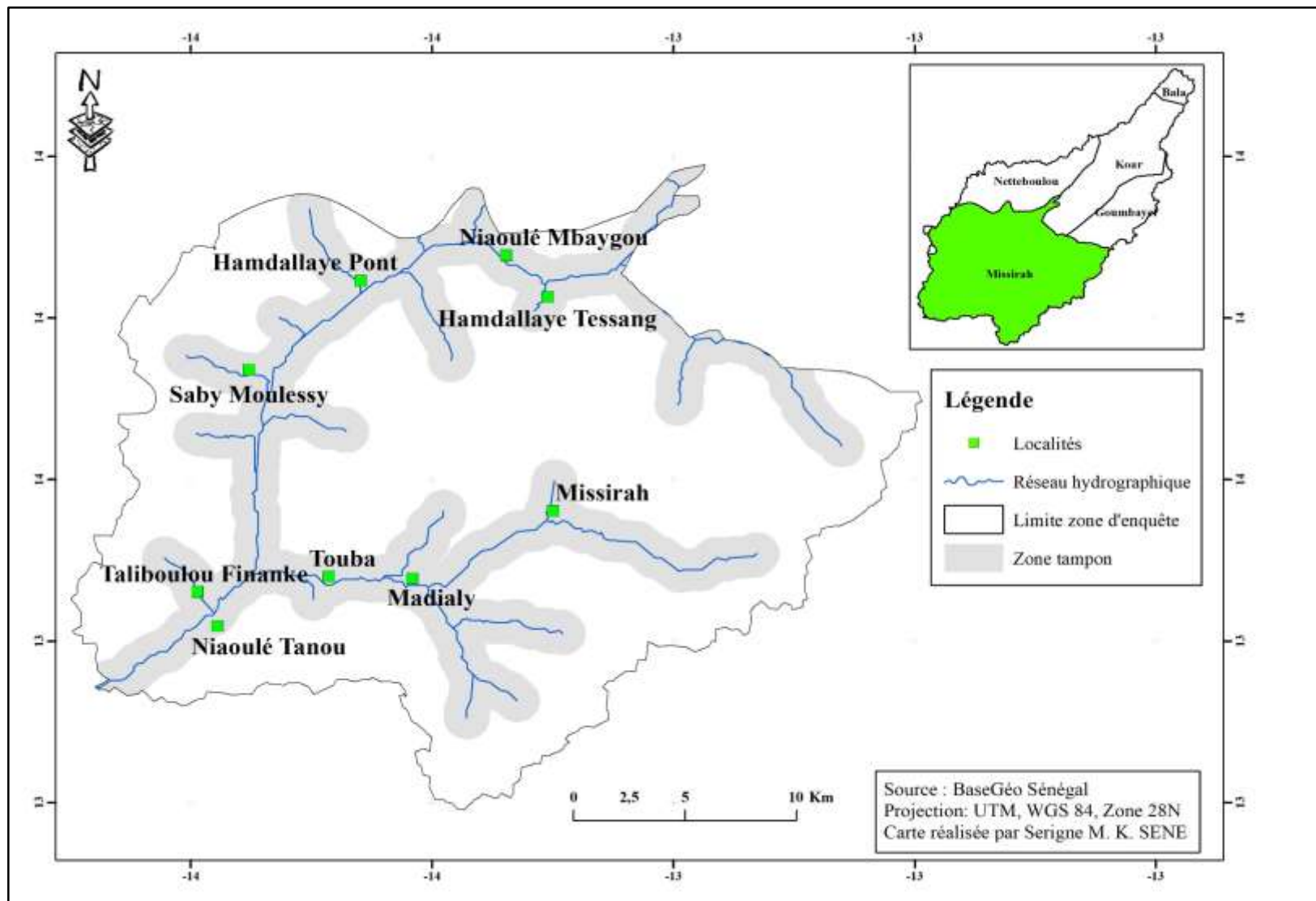
$$\text{Nombre de ménage à enquêter} = \frac{\text{Nombre total de ménage de la localité} \times 15}{100}$$

La liste des villages et la proportion des ménages interrogés sont données dans le tableau 1.

**Tableau 1:** Nombre de ménages à interroger pour chaque localité

	Localités à interroger	Longitude	Latitude	Nombre de ménages	Nombre de Ménages d'enquête
<b>Commune de Missirah</b>	Hamdallaye Pont	652207	1506235	85	13
	Hamdallaye Tessang	660401	1505526	142	21
	Madialy	654539	1492364	52	8
	Niaoulé Mbaygou	658573	1507454	48	7
	Niaoulé Tanou	646027	1490103	93	14
	Saby Moulessy	647331	1502055	33	5
	Taliboulou Finanké	645144	1491695	69	10
	Touba	650896	1492425	53	8
	Missirah	660679	1495548	570	86
<b>Total</b>				<b>1146</b>	<b>172</b>

Les données d'enquêtes ont été traitées avec le logiciel SPHINX. Ce logiciel nous a d'abord permis d'élaborer le questionnaire, de saisir des réponses fournies pour chaque questionnaire. Ensuite, nous avons effectué un dépouillement automatique des résultats d'enquête que nous avons exporté sur Excel pour confectionner des tableaux et graphiques. En outre, nous avons effectué des analyses bivariées avec le croisement de deux variables à partir de SPHINX. Les résultats sont surtout perceptibles dans la troisième partie de l'étude.



Carte 2: Localités enquêtées dans la commune de Missirah

# **PREMIÈRE PARTIE : CADRE PHYSIQUE DU BASSIN DU NIAOULE**

---

Le bassin fluvial offre le cadre parfait pour « une meilleure compréhension de l'interaction des facteurs morphologiques, litho-pédologiques, climatiques et biogéographiques » (Frécaut et Pagné, 1983).

Dans cette partie, nous analyserons, dans un premier temps, les facteurs stables du bassin à savoir l'hydrographie, la morphométrie, la géologie, la pédologie et la végétation. Ensuite, nous examinerons les facteurs climatiques qui déterminent les modalités de l'écoulement fluvial dans le bassin du Niaoulé.

## **Chapitre 1 : Le milieu et les facteurs stables de l'écoulement du bassin versant du Niaoulé**

---

L'analyse du milieu et des facteurs stables de l'écoulement d'un bassin versant revêt un caractère important dans la mesure où ces facteurs exercent une influence non négligeable sur sa réponse hydrologique. La réaction d'un bassin versant suite à une chute de précipitations est conditionnée par ses caractéristiques morphologiques (taille, forme, altitude, pente, etc.), pédologiques, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique.

### **I. Le réseau hydrographique**

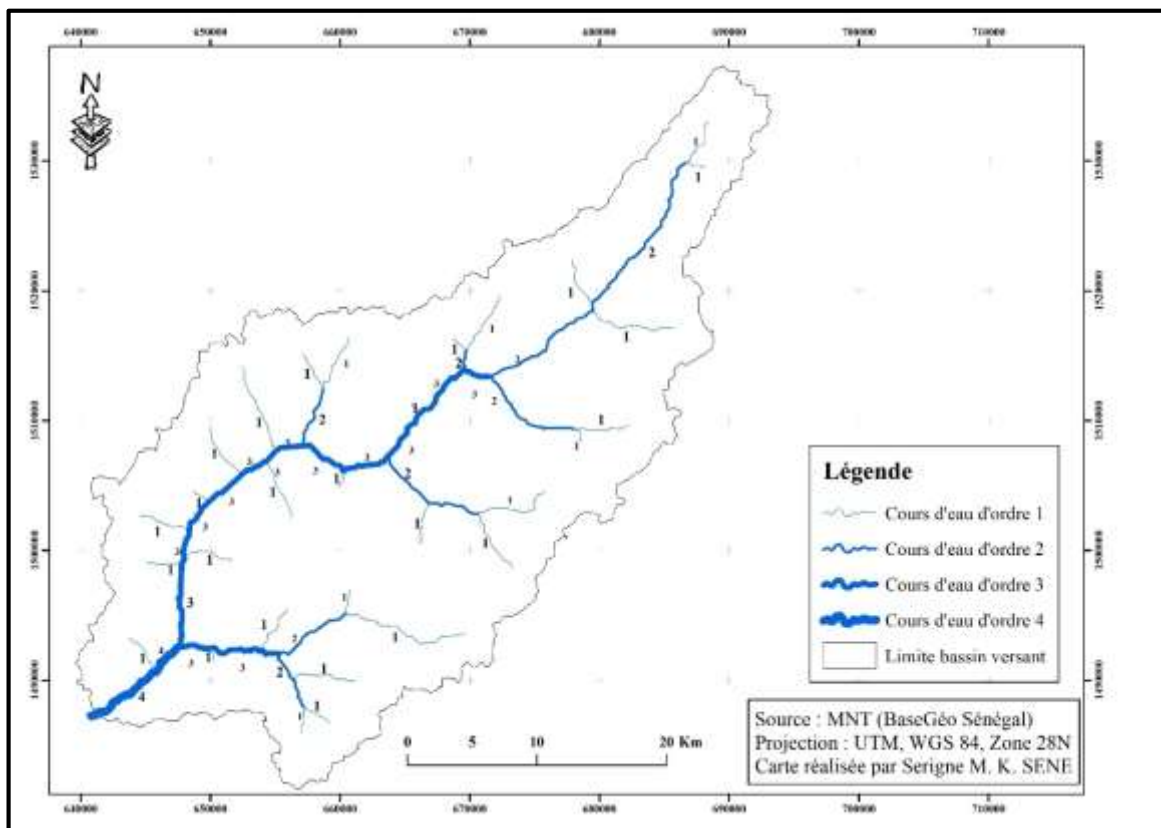
Le Niaoulé, comme la majorité des affluents du fleuve Gambie, se trouve en territoire sénégalais ; plus précisément dans la région de Tambacounda. Il s'agit là d'un affluent de rive droite entièrement situé sur les formations perméables du continental terminal (Konaté, 1998). Le Niaoulé dispose sur ses deux rives d'un bon nombre d'affluents à écoulement temporaire qui convergent vers le talweg principal. Cela laisse apparaître un réseau hydrographique en arête de poisson.

#### **1.1. La classification du Niaoulé par la méthode de Strahler (1957)**

Les segments du réseau hydrographique doivent être soumis à une hiérarchisation afin d'avoir une idée sur sa ramification (Gravelius, 1914). Ainsi, plusieurs hydrologues à l'instar de Horton (1945), Strahler (1957) et Shreve (1966) ont développé des méthodes de classification du réseau hydrographique dans un bassin versant. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode de Strahler (1957) qui est d'ailleurs la plus utilisée de nos jours.

Cette méthode est née de la volonté de corriger celle de Horton (1945) qui attribue un même numéro d'ordre à la totalité d'un cours d'eau ; ce qui donne une fausse idée de sa taille, car les sources et l'exutoire ont le même rang. La méthode de Strahler considère le tronçon comme l'unité hydrographique (Strahler, 1957). Par conséquent, un cours d'eau dépourvu d'affluent est d'ordre 1, un cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différents prend l'ordre du plus élevé des deux et un cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de 1.

Pour effectuer cette classification, nous avons utilisé l’outil *Hydrology* du logiciel ArcMap 10.5. La carte 5 montre les résultats de la hiérarchisation du réseau hydrographique du Niaoulé.



**Carte 3:** Classification du Niaoulé par la méthode de Strahler

## 1.2. La densité de drainage

Il s’agit là de déterminer la densité de drainage du réseau temporaire ( $Ddt$ ), car le Niaoulé est caractérisé par un écoulement saisonnier (Humbert, 1990). La densité de drainage exprime le rapport entre la longueur totale des cours d’eau du réseau ( $\Sigma L$ ) et la superficie du bassin drainé ( $A$ ). Elle est calculée avec la formule suivante :

$$Ddt = \frac{\Sigma L}{A}$$

La détermination des paramètres de calcul de la densité de drainage temporaire s’est effectuée à partir de l’exploitation d’un modèle numérique de terrain avec le logiciel ArcMap 10. Cela nous a permis d’obtenir la longueur des talwegs (tableau 2) pour enfin calculer la densité de drainage temporaire du bassin du Niaoulé qui est égale à  $0,18 \text{ Km/Km}^2$ .

**Tableau 2:** Longueur des talwegs du réseau hydrographique du Niaoulé

<b>Ordre</b>	<b>Nombre</b>	<b>Longueur en Km</b>
1	30	121,05
2	11	61,6
3	16	49,7
4	2	9,4
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>241,78</b>

Au regard du tableau 2, il apparaît clairement que les cours d'eau d'ordre 1 sont largement majoritaires. Sur un total de 59 cours d'eau classés, plus de 50% sont d'ordre 1. La présence de nombreux affluents de seconde importance répartis de part et d'autre des rives du Niaoulé décrit un réseau hydrographique en arête de poisson.

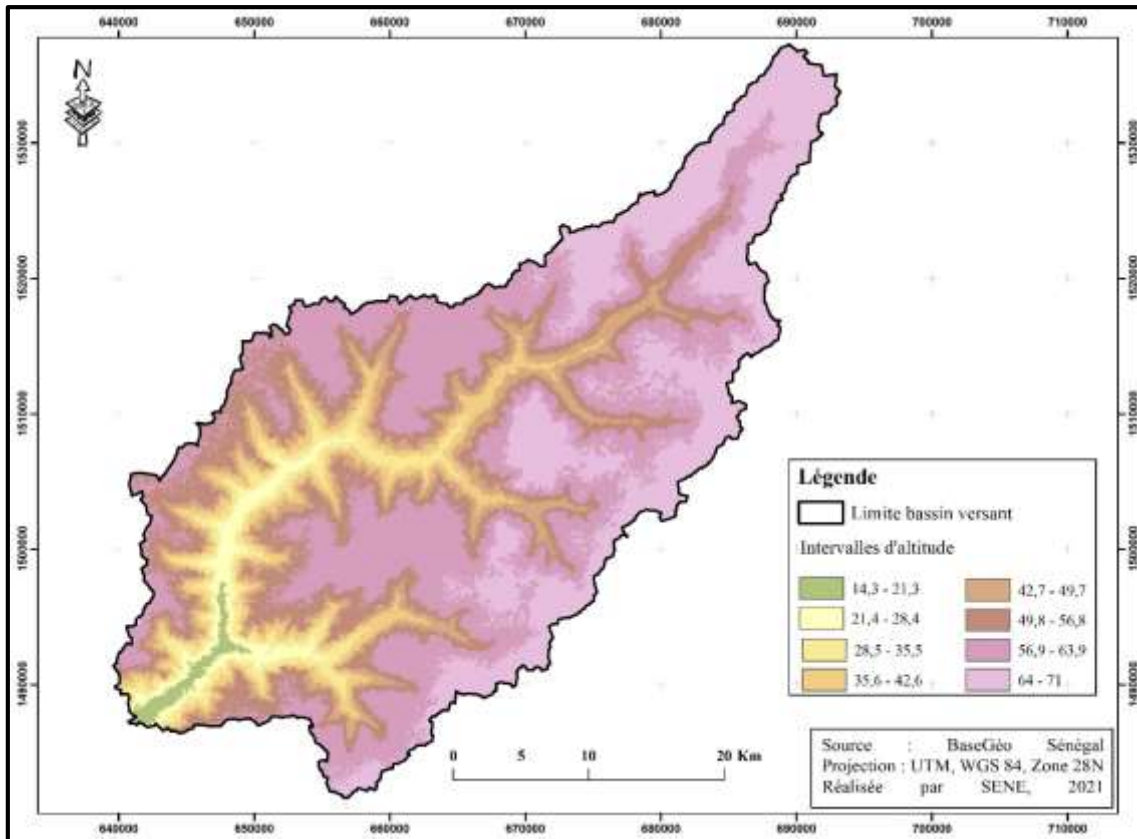
Il apparaît clairement que le Niaoulé se caractérise par la lâcheté du réseau hydrographique. Aussi, sa localisation dans les formations planes et perméables du continental terminal influence la forme de son réseau hydrographique.

## **II. Le relief et les caractéristiques morphométriques du bassin**

### **2.1. Le relief du bassin**

Le relief constitue un facteur déterminant dans la mesure où il conditionne l'écoulement des eaux de surface en Afrique occidentale (Leroux, 1980). Le bassin du Niaoulé laisse apparaître un relief uniforme caractérisé par la faiblesse des altitudes. Ces dernières varient entre 14 m, valeur minimale notée dans le secteur de l'exutoire notamment au sud-ouest du bassin, et 71 m qui représente l'altitude maximale se trouvant dans l'extrême nord-est du bassin (carte 6). Le bassin du Niaoulé présente dans sa globalité un plateau tabulaire avec une altitude moyenne inférieure à 43 m.





**Carte 4 : Plages d'altitudes du bassin versant du Niaoulé**

## 2.2. L'hypsométrie du bassin

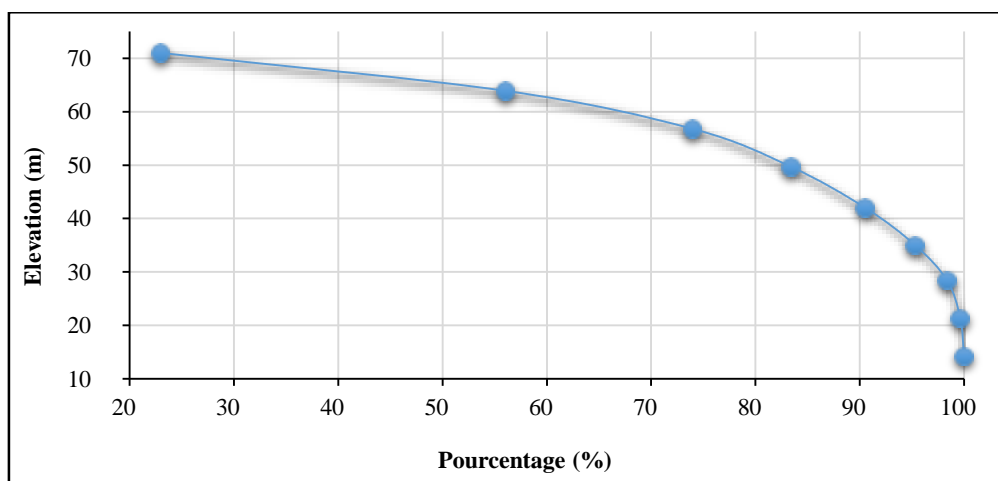
L'analyse de la courbe hypsométrique nous permet de mieux cerner le relief du bassin. En effet, cette courbe représente la distribution de la surface du bassin versant en fonction de l'élévation. Cette distribution hypsométrique fournit la proportion de la superficie totale du bassin comprise à l'intérieur de chaque plage d'altitude (OMM, 2012). Dans le cadre de cette étude, nous l'avons déterminé à l'aide du logiciel ArcMap 10.5. Avec le modèle numérique de terrain, nous avons effectué, dans un premier temps, une classification avec dix classes d'altitude. Ensuite, nous avons calculé la surface occupée par chaque classe avant de traduire cette surface en valeur relative (tableau 3). Enfin, nous avons effectué un cumul décroissant pour la représentation graphique de la courbe hypsométrique.

**Tableau 3:** Répartition de la superficie selon les tranches d'altitude dans le bassin du Niaoulé

Plages d'altitude (m)	Surface partielle (Km2)	Pourcentage (%)	Pourcentage au-dessus de la limite inférieure
14,3 - 21,3	22,01	1,62	100
21,4 - 28,4	41,52	3,06	96,94
28,5 - 35,5	64,83	4,78	92,16
35,6 - 42,6	96,79	7,14	85,02
42,7 - 49,7	128,08	9,45	75,57
49,8 - 56,8	243,06	17,92	57,65
56,9 - 63,9	448,19	33,05	24,60
64 - 71	311,51	22,97	1,62

La distribution hypsométrique du Bassin du Niaoulé laisse entrevoir deux zones : une zone plus basse et une zone relativement élevée.

La figure 1 représente l'hypsométrie du bassin qui décrit, dans un premier temps, une zone basse concentre 16.6% de la superficie totale du bassin et regroupe les altitudes inférieures à 43 m. Elle correspond aux versants, pentes et glacis d'épandage qui se localise de part et d'autre du réseau hydrographique et surtout vers l'exutoire du Niaoulé. La seconde zone regroupe les altitudes situées entre 43 m et 71 m et englobe 83,4 % de la surface totale du bassin. Elle est constituée par les plateaux et les buttes résiduels qui délimitent le bassin. Ainsi, nous notons une décroissance des altitudes du bassin partant du Nord-est au Sud-ouest.



**Figure 1 :** Courbe hypsométrique du bassin du Niaoulé

La courbe hypsométrique constitue un outil pratique permettant de comparer les diverses sections d'un bassin versant afin d'estimer le comportement hydrologique de son système de drainage. La forme concave adoptée par la courbe hypsométrique du bassin versant du Niaoulé traduit l'état de maturité du bassin.

### 2.3. La forme du bassin

La forme du bassin joue un rôle important dans la mesure où elle exerce une influence sur l'écoulement global mais également sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire. Pour caractériser la forme d'un bassin versant, les hydrologues utilisent l'indice de compacité de Gravelius ( $K_G$ ) proposé en 1914. Il s'agit d'un indicateur essentiel dans l'appréciation de la forme d'un bassin et entre dans l'équation permettant de déterminer les dimensions du rectangle équivalent (tableau, 4). Ce dernier n'est rien d'autre que la transformation géométrique du bassin réel tout en conservant la même superficie, le même périmètre et par conséquent la même répartition hypsométrique.

**Tableau 4:** Formule de calculs des paramètres avec le rectangle équivalent

Paramètres	Formules de calcul avec $K_G$	Paramètres	Formules de calcul avec $K_G$
Longueur (L)	$L = \frac{(K_G \sqrt{A})}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{\left(1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2\right)} \right]$	Largeur (l)	$l = \frac{(K_G \sqrt{A})}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{\left(1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2\right)} \right]$
Périmètre (P)	$P = \frac{K_G \sqrt{A}}{0,28}$	Surface (A)	$A = \left[ \frac{P \times 0,28}{K_G} \right]^2$

L'indice de compacité de Gravelius ( $K_G$ ) est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (Roche, 1963 ; Ward et *al.*, 1975 ; OMM, 2012). Ainsi, si A est la surface du bassin en  $\text{km}^2$  et P son périmètre stylisé en km, le coefficient de compacité est déterminé par la formule suivante:

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Le coefficient  $K_G$  est toujours supérieur à 1 et traduit de manière générale deux formes :

- ❖ Si  $1,5 < K_G < 1,8$  ; le bassin est de forme allongée.
- ❖ Si  $1,0 < K_G < 1,15$  ; le bassin est de forme ramassée.

En ce qui concerne le bassin du Niaoulé, cet indice est égal à 1,25 (tableau, 5) traduisant ainsi la forme allongée du bassin qui s'étire du Sud vers le Nord. Les données morphométriques du bassin sont regroupées dans le tableau 5.

**Tableau 5:** Paramètres morphométriques du bassin versant du Niaoulé

Bassin du Niaoulé	Rectangle équivalent				
	Longueur (Km)	Largeur (Km)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Kg
Valeurs	59,78	22,69	1356	165	1,25

#### 2.4. Les indices de pente

Le relief du bassin peut être également appréhendé à travers les indices de pentes. Les indices de pentes donnent une idée sur le caractère de l'écoulement. Nous distinguons l'indice de pente global (I<sub>g</sub>) et l'indice de pente de Roche (I<sub>p</sub>).

##### 2.4.1. L'indice de pente global de Dubreuil (I<sub>g</sub>)

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% et la surface du bassin (Dubreuil, 1974). Cet indice, exprimé en mètre par kilomètre (m/km), donne une idée sur l'inclinaison globale du bassin. L'indice global de pente est obtenu en appliquant la formule suivante :

$$I_g = \frac{H_{95\%} - H_{5\%}}{L}$$

avec  $L$  : longueur du rectangle équivalent

Le bassin du Niaoulé présente un indice de pente global égal à 0,65 m / Km. Dès lors, nous pouvons déterminer la dénivelée spécifique par le produit de cet indice à la racine carrée de la superficie du bassin. Ainsi, cette dénivelée est égale à 23,9 m et justifie la faiblesse du relief dans le bassin du Niaoulé d'après la classification de l'ORSTOM.

##### 2.4.2. L'indice de pente de Roche (I<sub>p</sub>)

Défini par Roche (1963), cet indice constitue une synthèse du relief représenté par les courbes de niveau. L'indice de pente de Roche permet également de mieux rendre compte, de l'influence du facteur pente sur le régime hydrologique du bassin. Appelé ainsi indice de susceptibilité à l'écoulement, il est obtenu en appliquant la relation suivante :

$$I_p = L^{-1/2} \sum_n^1 \sqrt{a_i \cdot d_i}$$

avec : L = longueur du rectangle équivalent ;  $a_i$  = portion (%) de la surface A du bassin comprise entre deux courbes de niveau voisines  $c_i$  et  $c_{i-1}$  ;  $d_i = c_i - c_{i-1}$ , dénivelée entre les deux courbes de niveau voisines.

L'indice de pente de Roche calculé pour le bassin du Niaoulé est égal à 1,07 ; ce qui montre encore une fois la faiblesse des pentes.

### III. Les caractéristiques géologiques du bassin

#### 3.1. La structure géologique du bassin

Le bassin versant du Niaoulé est caractérisé par une seule structure géologique. Il s'agit de celle du Continental Terminal (Michel, 1973). Cette formation sédimentaire laisse entrevoir des faciès grès-argileux parfois tachetés d'oxyde de fer (encore appelés « grès de Goudiry ») ainsi que des sables hétérogènes du Continental Terminal datant du Miopliocène (Baretto, 1966).

La mise en place des formations du Continental Terminal fait suite à un long processus qui remonte du secondaire au tertiaire. En effet, l'espace littoral Sénégal-mauritanien a subi des phases de soulèvement et d'affaissement. Ces mouvements ont engendré la mise en place du bassin sénégalo-mauritanien. Il s'agit là d'une cuvette qui s'étend du Nord-Ouest de la Guinée Bissau à l'ouest de la Mauritanie. À l'éocène supérieur, cette dernière a accueilli le matériel détritique issu de l'érosion différentielle qui fait suite au soulèvement épeirogénique nouvel (Niang, 1998). Ainsi, ce bassin sénégalo-mauritanien est devenu un siège de plusieurs types de sédimentations ; ce qui forme la série du Continental Terminal (Sow, 2007). En effet, la sédimentation était d'abord caractérisée par des faciès sablo-gréseux. Ensuite, elle a été marquée par les faciès d'argile et les faciès de calcaire et de marne (Michel, 1973). Par ailleurs, une cuirasse ferrugineuse recouvre parfois les couches détritiques.

Dans le bassin du Niaoulé, cette cuirasse ferrugineuse est souvent perçue au niveau des plateaux à manteau latéritique mais également sur les sommets tabulaires, sur les glacis en contre-bas des reliefs tabulaires et sur les interfluves. Aussi, des sables limoneux sont présents sur les lits des talwegs (Sow, 2006 ; Sow 2008).

### **3.2. La perméabilité du bassin**

La perméabilité du bassin laisse entrevoir sa capacité à transférer les eaux reçues à la surface vers les horizons plus profonds du sol. Certains facteurs peuvent être analysés pour caractériser la perméabilité du bassin du Niaoulé.

Les affleurements de cuirasse ferrugineuse dans le bassin du Niaoulé peuvent constituer un facteur déterminant sur la capacité d'infiltration dans la mesure où ils se caractérisent par une induration formée par des sesquioxydes de fer sous l'effet des températures élevées et de la forte évaporation (Leprun, 1979). Toutefois, le démantèlement de la cuirasse laisse apparaître, dans certaines circonstances, des failles, des fractures ou linéaments tectoniques dans les lieux broyages des roches. Cela favorise la perméabilité et par extension l'infiltration des eaux.

De plus, cette perméabilité peut être perçue à travers les résultats obtenus avec la classification de l'ORSTOM (actuel IRD) proposée par Dubreuil et Guiscafré (1970). Cette classification se fait sur la base d'une échelle s'appuyant uniquement sur la structure physique de la roche et son état de fissuration. Cette échelle est constituée par neuf (09) classes de perméabilité (*P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, S1 et S2*) avec chacune une norme. Parmi ces classes, deux (02) correspondent aux caractéristiques géologiques de notre bassin comme le constate certains auteurs (Konaté, 1998 ; Sow, 2006 ; Sow, 2008). Ces deux classes témoignent du caractère perméable du bassin d'autant plus qu'elles reflètent des faciès à perméabilité forte à moyenne. Il s'agit d'abord de la classe *S2* constituée par des alluvions et sables graveleux dans lesquels les argiles sont pratiquement inexistantes. La perméabilité de cette formation se justifie par la présence des nappes temporaires dans les alluvions fluviales. Ensuite, nous avons la classe *P2* qui regroupe les sables et les grès du Continental Terminal à perméabilité d'interstices et qui peuvent donner lieu à une nappe assez bien fournie.

Par conséquent, cette perméabilité des formations du bassin du Niaoulé conjuguée à une pluviométrie importante peut engendrer la mise en place de réserves souterraines qui, à leur tour, peuvent assurer le soutien des étiages.

### **IV. La pédologie et les formations végétales du bassin**

Les sols et la végétation constituent également des facteurs déterminants dans l'écoulement d'un cours d'eau.

#### **4.1. Les caractéristiques pédologiques du bassin**

La pédologie joue un rôle important dans la réponse hydrologique d'un bassin versant dans la mesure où la nature des sols influe sur la perméabilité de l'espace. Cette dernière constitue un paramètre qui nécessite une prise en considération dans la compréhension du cycle hydrologique notamment dans les processus d'infiltration et d'exfiltration. En effet, plus un sol est perméable plus sa capacité d'infiltration et d'exfiltration est meilleure. Dans le bassin du Niaoulé, nous pouvons identifier les sols ferrugineux tropicaux, les sols minéraux bruts (lithosols et régosols) et les sols peu évolués (carte 7).

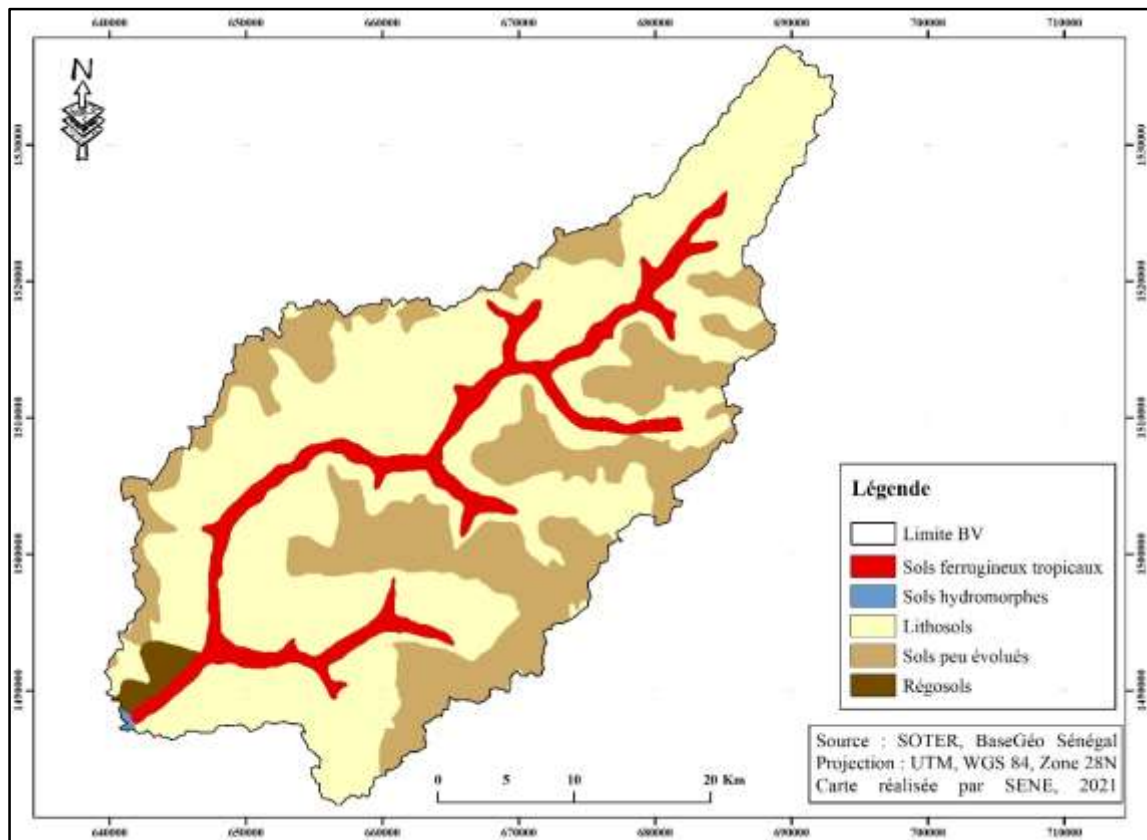
##### **4.1.1. Les sols ferrugineux tropicaux**

Les sols ferrugineux tropicaux sont particulièrement influencés par les climats continentaux d'où leur localisation dans l'hinterland du Sénégal (Maignien, 1965). Très caractéristiques, ces sols jalonnent les entailles du continental terminal. Ils peuvent être parfois un peu plus sableux en surface. Les sols ferrugineux tropicaux représentent 9,6% des sols du bassin et peuvent être séparés en deux groupes. Le premier groupe englobe les sols ferrugineux tropicaux lessivés sur matériaux argilo-sableux à argileux plus ou moins limoneux de colmatage qui représentent qui occupent les plateaux (Konaté, 1998). Le second groupe concerne les sols ferrugineux tropicaux lessivés sur matériau sablo-argileux à argilo-sableux qui se sont développés sur des produits remaniés du Continental Terminal par le réseau hydrographique (Sow, 2006). Les sols ferrugineux tropicaux sont très répandus sur tous les axes de drainage du Niaoulé.

##### **4.1.2. Les sols minéraux bruts**

Ce sont des types de sols caractérisés par des débris de roche faiblement décomposés et souvent dépourvus de matière organique ; d'où leur nom de sol squelettique. Il s'agit, dans le bassin du Niaoulé, des sols peu évolués et non climatiques issus du déblaiement de la cuirasse et des gravillons induit par l'eau (Maignien, 1965). Les sols minéraux bruts contenus dans le bassin du Niaoulé peuvent être divisés en deux groupes. Il s'agit d'abord des sols régoliques (régosols) sur matériau gravillonnaire de démantèlement des cuirasses qui couvre 14,9 Km<sup>2</sup> de la surface totale du bassin. L'autre groupe concerne les sols lithiques (lithosols) sur cuirasse qui, avec 59,8% de superficie couverte, sont les plus représentés dans le bassin (tableau 6). Ces lithosols, classés dans la famille des cuirasses ferralitiques sur schistes et grès argileux, sont à

l'affleurement du Sénégal oriental (Maignien, 1965). Dans le bassin du Niaoulé, ils se localisent au niveau des bordures de plateaux et interfluves de topographie plane.



**Carte 5:** Carte des sols du bassin

#### 4.1.3. Les sols peu évolués

Les sols peu évolués reposent sur des matériaux gravillonnaires. D'après Khouma (2000), ces sols font partie des types les plus remarquables dans le Sud-est du Sénégal. Il s'agit des sols non climatiques, composés de sables grossiers et de cailloux d'origine hydromorphes. Ces types de sols se sont développés sur les éboulis de cuirasse accumulés au pied des escarpements rocheux du bassin du Niaoulé. Ils concentrent 29,4% de la surface totale du bassin (tableau 6). Raccordés aux axes de drainage, ces sols subissent un engorgement dû à la platitude du relief qui affaiblit l'écoulement. Les sols sur matériau gravillonnaire du bassin du Niaoulé peuvent être scindés en deux catégories. Il s'agit d'abord des sols relativement argileux qui recouvrent les plateaux. Cette catégorie est surtout perçue dans la partie nord-est du bassin. La deuxième catégorie concerne les sols relativement limoneux à argileux des plateaux qui occupent la plus grande partie des sols peu évolués.



#### 4.1.4. Les sols hydromorphes

Les sols hydromorphes sont caractérisés par l'excès d'eau. Cet excès peut être dû à la présence quasi permanente de l'eau inondant le sol ou à la remontée d'une nappe souterraine (Favrot et Vizier, 1988). Dans le bassin du Niaoulé, les sols hydromorphes sont localisés vers l'exutoire (carte 7) du bassin qui constitue le point de convergence des eaux d'un bassin.

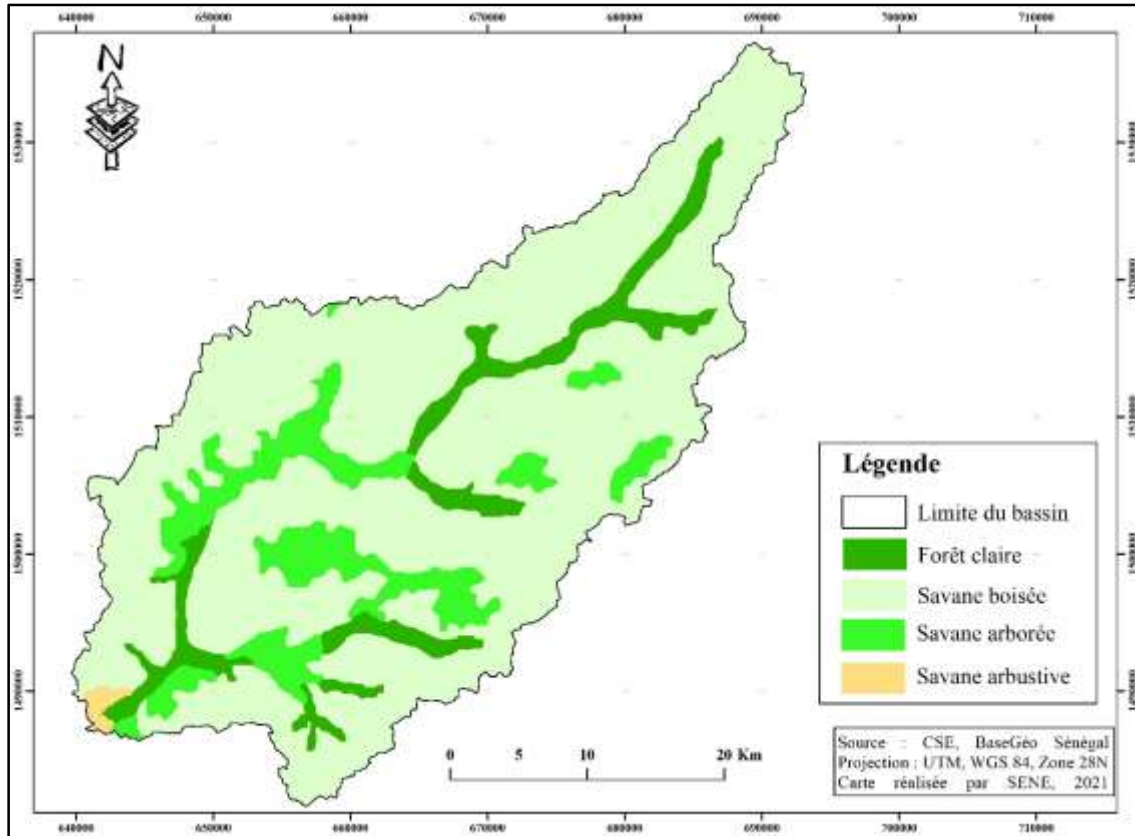
**Tableau 6:** Proportion des principaux types de sols répertoriés dans le bassin du Niaoulé

Types de sols	Superficie (en Km2)	Superficie (en %)
Sols ferrugineux tropicaux	130	9,6
Lithosols	810	59,8
Régosols	14,9	1,1
Sols hydromorphes	1,8	0,1
Sols peu évolués	399	29,4
<b>Total</b>	<b>1356</b>	<b>100</b>

En somme, le bassin du Niaoulé est caractérisé, dans sa globalité, par des sols à horizons minces qui proviennent souvent de l'érosion. Avec leur évolution faiblement importante et leur faible profondeur, ils ne pourraient pas contenir une nappe importante. En outre, nous notons des recouvrements de cuirasse qui, après démantèlement, peuvent constituer des parois favorisant l'infiltration de l'eau dans la nappe profonde du maestrichtien. Les sols constituent les supports du couvert végétal qui intervient également dans l'écoulement dans un bassin versant.

#### V. Les formations végétales du bassin

Inhérente aux facteurs climatiques, pédologiques et aspirations sociétales, la végétation constitue un facteur déterminant de l'écoulement dans un bassin versant. Elle peut en outre être façonnée par les liens qu'elle entretient avec les sociétés. Dans le bassin du Niaoulé, les formations végétales sont relativement homogènes et sont essentiellement constituées de savanes (boisée, arborée et arbustive) et quelques portions de forêts claires que l'on peut identifier sur la carte 8.



**Carte 6:** Les formations végétales dans le bassin du Niaoulé

#### 4.1. La forêt claire et la savane boisée

Le regroupement de ces deux types de formation végétale témoigne de la difficulté de leur distinction. La forêt claire est caractérisée par des arbres de petite et moyenne taille dont les cimes sont relativement jointives ; ce qui laisse filtrer la lumière (Aubréville, 1957). De même, la savane boisée constitue une formation végétale caractérisée par des arbres et des arbustes qui laissent apparaître un couvert clair (Da Lage et Métaillé, 2005). En revanche, dans la forêt claire, la densité et la taille des arbres sont plus importantes avec un recouvrement par les cimes des arbres et des arbustes compris entre 50% et 75% (Adam, 1966 ; Solly, 2021). Dans le bassin du Niaoulé, ces deux formations s'étalent sur les vallées larges notamment au-dessus des sols sableux et colluviaux, et les plateaux constitués de sols ferrugineux tropicaux (Sow, 2006). Nous retrouvons aussi une ripisylve constituée d'arbres avec une hauteur relativement importante qui s'étale au niveau des berges du Niaoulé. La ripisylve constitue une forêt-galerie assimilée à un « paysage » forestier tributaire des cours d'eau dans les régions de formations ouvertes et de savane à la faveur de l'humidité qu'ils entretiennent (Aubréville, 1957 ; Solly, 2021).

## **4.2. La savane arborée**

Dans le bassin du Niaoulé, la savane arborée s'observe au-dessus des plateaux et des portions ondulées avec des pentes faibles. Elle se caractérise par la présence d'arbres et arbustes disséminés dans le tapis graminée (Descoings, 1978).

## **4.3. La savane arbustive**

Elle constitue une formation composée d'arbustes disséminés avec la présence d'une strate herbacée continue (Aubréville, 1957). La savane arbustive occupe une faible portion du bassin ; nous la retrouvons uniquement vers l'exutoire.

À cette étape de notre analyse, nous constatons l'absence de certaines formations très denses à l'instar des forêts denses qui disposent d'une couverture végétale très importante pouvant ralentir davantage l'écoulement. Cela est sans doute dû aux caractéristiques pédologiques. En effet, la cuirasse ne peut pas supporter de grands arbres sauf si celle-ci est discontinue. D'ailleurs, les arbres de taille importante sont parfois localisés dans les endroits où la cuirasse est démantelée notamment sur les rebords des plateaux (Sow, 2006).

## **Conclusion partielle**

L'analyse des facteurs stables du bassin du Niaoulé révèle dans sa globalité les incidences que la géologie, du relief, de la pédologie et de la végétation peuvent avoir sur la réponse hydrologique du bassin suite à la chute de précipitations. Ainsi, la faiblesse de la pente conjuguée à la nature des lithosols sur cuirasse provoque la rétention des eaux de surface. Cela contribue à la réduction de l'écoulement et favorise les pertes par évaporation. De l'autre côté, le caractère perméable du bassin favorise l'infiltration qui, à son tour, peut assurer le soutien des étiages si elle est importante. Avec une pluviométrie abondante, les nappes peuvent être bien remplies et par conséquent soutenir les étiages.

## Chapitre 2 : Le climat et sa variabilité dans le bassin du Niaoulé

---

L'analyse du climat et de sa variabilité constitue une phase importante pour toutes les études hydrologiques effectuées dans la zone tropicale. Le climat constitue le principal facteur d'analyse des ressources en eau dans un espace donné. En outre, les paramètres climatiques tels que la pluviométrie et l'évaporation conditionnent les disponibilités en eau d'un bassin.

### I. Les mécanismes de la circulation générale

Les mécanismes généraux sont appréhendés à travers l'analyse des centres d'action, les masses d'air et les discontinuités. En réalité, le climat du bassin du Niaoulé est commandé par les centres d'action situés de part et d'autre de l'Équateur géographique. Ces derniers émettent des flux qui sont séparés par l'Équateur Météorologique dont la trace au sol est appelée « Front Intertropicale de Transition » (FIT). La migration de cette dernière détermine les types de saisons (Leroux, 2000 ; Sagna, 2005).

#### 1.1. Les centres d'action

En Afrique de l'Ouest, la circulation atmosphérique générale est régie par le dynamisme de trois centres d'action à savoir l'anticyclone des Açores, l'anticyclone de Sainte Hélène et l'anticyclone Saharo-libyen.

Les anticyclones des Açores et de Sainte Hélène sont caractérisés par leur permanence et sont d'origine dynamique. Le premier est centré dans la partie septentrionale Atlantique et l'autre dans la partie méridionale de l'Atlantique.

Situé au cœur du Sahara, l'anticyclone Saharo-libyen exerce son influence sur le bassin pendant la saison sèche froide (notamment entre janvier et mai) grâce aux renforts thermiques issus du continent (Niang, 1998). Pendant l'Été, nous avons l'apparition du flux de mousson issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène. L'anticyclone Saharo-libyen est donc saisonnier et d'origine thermique.

#### 1.2. Les masses d'air

Générées par les centres d'action précités se caractérisent par leur origine et leur parcours. L'influence de l'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores est absente à cause de la situation très continentale du bassin. Il n'atteint pas l'embouchure de la Gambie (Konaté, 1998).

Le bassin du Niaoulé connaît ainsi l'influence de deux flux : l'alizé continental (harmattan) et la mousson.

L'alizé continental ou harmattan est un vent chaud et sec qui provient de l'anticyclone Saharo-libyen. Il se manifeste pendant toute l'année, mais sa présence dans la zone du bassin du Niaoulé est plus manifeste en saison sèche (de novembre à avril) (Sagna, 2005).

La mousson, quant à elle, est un vent tiède chargé d'humidité. Elle est issue de l'anticyclone de Sainte-Hélène. En effet, lorsque le flux d'alizé issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène traverse l'Équateur géographique et prend la direction SW-NE sous l'impulsion de la force de Coriolis, il devient un flux de mousson dans l'hémisphère Nord. La mousson se manifeste dans le bassin du Niaoulé pendant la saison pluvieuse (de mai à octobre). Cette masse d'air est favorable aux conditions pluviométriques.

### **1.3. La trace au sol de l'Equateur Météorologique**

La principale discontinuité notée dans le bassin du Niaoulé est l'Equateur Météorologique (EM). Ce dernier constitue une ligne invisible séparant les alizés provenant du Nord et la mousson venant du Sud (Leroux, 1980). La trace au sol de l'EM est appelée « Front Intertropicale de Transition » (FIT). Au-dessus du FIT, nous avons une zone non pluvieuse tandis qu'en dessous nous avons une zone pluvieuse. En outre, L'influence des cellules anticycloniques engendre un balancement saisonnier du FIT et, par conséquent, nous observons une migration de la zone pluvieuse.

La zone non pluvieuse est dominée par la circulation de l'alizé continentale qui impose une faible humidité et de fortes températures au bassin. Dans cette zone la pluie est rare, voire inexistante. Toutefois, il peut y avoir des pluies de « Heug » sous l'effet des incursions d'air polaire dans le domaine tropical.

La couverture du bassin par la zone pluvieuse annonce l'installation du flux de mousson. Cette période est favorable aux chutes de précipitations. Ces dernières sont dominées par les pluies liées aux lignes de grains qui se traduisent par des perturbations pluvio-orageuses d'intensité relativement forte (Leroux, 1980).

Le FIT intervient au sud du bassin au mois de mai pour migrer lentement vers le nord jusqu'au mois d'octobre ou il commence à se retirer. Au mois de novembre, il se positionne en dessous

du bassin. Cela montre que la remontée de la trace au sol de l'EM est lente ; alors que son retrait est rapide. Cette migration du FIT contribue à la détermination du régime pluviométrique.

## II. Le régime pluviométrique du bassin et sa variabilité

### 2.2. Le régime pluviométrique

Le régime pluviométrique du bassin du Niaoulé peut s'appréhender à travers le cumul pluviométrique annuel et la durée de la saison pluvieuse. Pour déterminer la durée de la saison pluvieuse, nous nous sommes référés aux critères agronomiques relatifs à la définition du début et de la fin de la saison des pluies. Il s'agira, pour la date de démarrage de la saison, d'observer à partir du 1<sup>er</sup> mai si nous avons un cumul pluviométrique supérieur ou égal à 20 mm sur 3 jours consécutifs et qu'après 30 jours nous ne constatons pas une absence de la pluie pendant au moins une semaine (Sivakumar, 1988 ; Gueye et Sivakumar, 1992 ; Balme et *al.*, 2005). La date de la fin de l'hivernage dans notre bassin correspond au dernier événement de plus de 10 mm non précédé par un épisode sec de plus de 20 jours à partir du 1<sup>er</sup> octobre (Gueye et Sivakumar, 1992).

Dans le cadre de ce travail, l'analyse du régime pluviométrique a été effectuée avec les données de la station de Tambacounda (tableau, 7).

**Tableau 7:** Situation et caractéristiques du domaine climatique à la station de Tambacounda

Station	Domaine climatique	Latitude (N)	Longitude (O)	Saison pluvieuse												Hauteur de pluie moyenne	
				J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
Tambacounda	Nord soudanien continental	13°08 - 14°28	16°04 - 11°04														Entre 500 et 1000 mm

La station de référence est située dans le domaine nord-soudanien caractérisé par une pluviométrie annuelle comprise entre 500 et 1000 mm et répartie entre 6 mois au plus. Nous notons ainsi une grande fluctuation de la pluie qui peut être cernée à différentes échelles.

### 2.2. La variabilité de la pluie

La variabilité pluviométrique est analysée à la station de Tambacounda (1951-2020) à l'échelle mensuelle et annuelle.

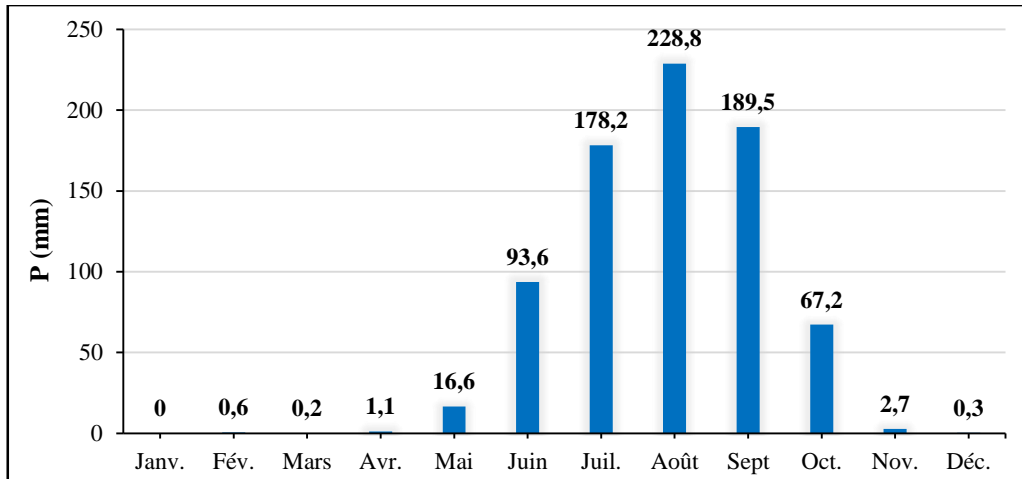
### 2.2.1. La variabilité mensuelle de la pluie

Pour analyser la variabilité mensuelle de la pluie, il incombe de déterminer certains paramètres tels que les coefficients de variation, les coefficients pluviométriques, la fréquence des débuts, des fins et des maximums de la saison pluvieuse, entre autres (tableau 8).

**Tableau 8:** Caractéristiques de la pluie moyenne à la station de Tambacounda (1951-2020)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	AN
<b>Nombre d'observations</b>	70	70	70	70	70	70	70	70	68	67	70	70	70
<b>Nombre d'observations manquantes</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0
<b>Pluie moyenne (mm)</b>	0,0	0,6	0,2	1,1	16,6	93,6	178,2	228,8	189,5	67,2	2,7	0,3	778,7
<b>Écart-type</b>	0,1	3,1	0,6	5,5	22,6	46,7	67,3	97,8	90,8	58,6	8,2	1,1	185,4
<b>Coefficients de variation</b>	3,51	4,96	3,78	5,02	1,37	0,50	0,38	0,43	0,48	0,87	3,07	4,26	0,24
<b>Maximum de la série (mm)</b>	0,7	23,8	3,6	41,6	105,9	216,6	384,9	458,4	441	288,8	58	6,3	1245,9
<b>Minimum de la série (mm)</b>	0	0	0	0	0	20,6	56,8	3	55	0,2	0	0	433,6
<b>Écarts (mm)</b>	0,7	23,8	3,6	41,6	105,9	196	328,1	455,4	386	288,6	58	6,3	812,3
<b>Coefficients pluviométriques (%)</b>	0,00	0,08	0,02	0,14	2,13	12,02	22,88	29,38	24,34	8,63	0,34	0,03	100
<b>Débuts saisons pluvieuses (%)</b>				<b>1,4</b>	<b>32,9</b>	<b>65,7</b>							100
<b>Maximum des saisons pluvieuses (%)</b>							<b>25,7</b>	<b>52,9</b>	<b>21,4</b>				100
<b>Fins des saisons pluvieuses (%)</b>										<b>88,6</b>	<b>11,4</b>		100

Ce tableau montre que pendant la période 1951-2020, le cumul pluviométrique moyenne enregistrée à la station de Tambacounda, équivaut à 778,7mm. Aussi, les débuts des saisons pluvieuses sont plus fréquents au mois de juin (65,7%). Toutefois, nous notons une fréquence non-négligeable pour le mois de mai avec 32,9%. Les saisons pluvieuses ont tendance à s'achever au mois d'octobre dans 88,6% des cas, contre 11,4% en novembre. Cette analyse fréquentielle sur la saison pluvieuse montre qu'il y a eu un raccourcissement de celle-ci par rapport aux années 1950. Ce raccourcissement de la saison pluvieuse est d'ailleurs constaté dans plusieurs endroits du pays (Diop, 1996 ; Camberlin et Diop, 2003 ; Sané, 2003). La majorité de la pluviométrie se concentre entre juin et octobre qui regroupent 97,3% du cumul moyen annuel de la série (778,7 mm) dans la zone du bassin (figure, 2).



**Figure 2 :** Évolution moyenne mensuelle de la pluie à la station de Tambacounda (1951-2020)

Le maximum des saisons intervient le plus souvent au mois d'août avec 228,8 mm en moyenne, soit une fréquence de 52,9%. Toutefois, il peut également intervenir au mois de juillet (25,7 %) ou au mois de septembre (21,4 %).

Nous constatons également qu'à la station de Tambacounda (1951-2020), la pluviométrie se caractérise par une forte variabilité. Cette dernière est perçue par le biais des coefficients de variation. Ces coefficients sont plus faibles pour les mois pluvieux que pour les mois non pluvieux (de novembre à mai). Dans les mois non pluvieux, le coefficient de variation s'établit entre 1,37 et 5,02 ; ce qui est très élevé. Cela rejoint la thèse de Sow (2006) à savoir : « plus c'est pluvieux, moins c'est variable ».

L'analyse de la variabilité mensuelle de la pluie à la station de Tambacounda (1951-2020) révèle dans sa globalité une forte fluctuation. La saison pluvieuse varie entre 6 et 5 mois. La durée de la saison pluvieuse est très fluctuante d'une année à l'autre. Le maximum pluviométrique intervient le plus souvent au mois d'août pour la majorité de la série. Il peut également survenir quelques fois au mois de juillet ou au mois de septembre. Aussi, le début de la saison pluvieuse n'est pas figé. La saison démarre le plus souvent au mois de mai ou juin et se termine soit en octobre, soit en novembre.

Nous sommes dans le régime pluviométrique tropical nord-soudanien avec un caractère unimodal qui laisse entrevoir une saison pluvieuse et une saison non pluvieuse avec une durée relativement égale.



## 2.2.2. La variabilité annuelle de la pluie

Ici, nous analysons la variabilité interannuelle de la pluie à la station de Tambacounda. Pour cela, nous avons utilisé l'Indice Standardisé de Précipitation (ISP) combiné avec le test de rupture de Pettitt et le test de tendance de Mann-Kendall.

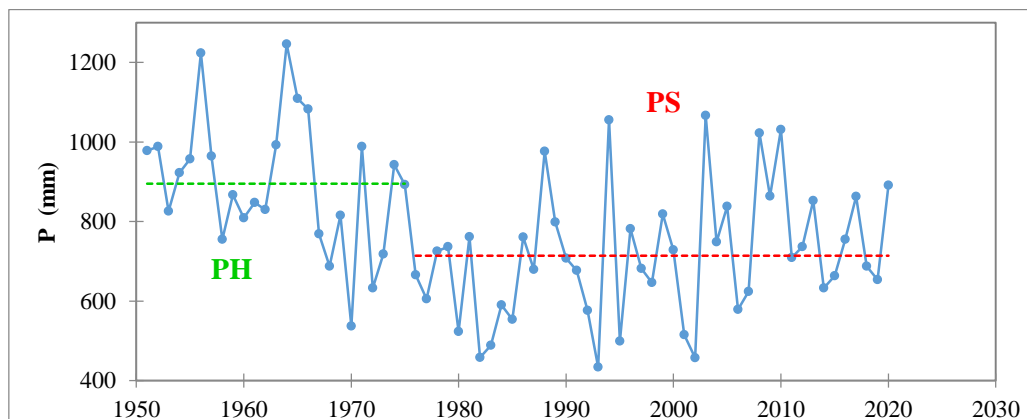
### 2.2.2.1. L'analyse de l'homogénéité de la pluie avec le test de Pettitt

Ce test réalisé avec le logiciel XLSTAT 2014 nous permet de voir s'il y a une année à partir de laquelle nous avons un changement dans l'évolution des données pluviométriques de la série utilisée. Rappelons que notre série s'étend de 1951 à 2020. Plusieurs études concernant le territoire sénégalais ont globalement montré une rupture dans la série des données pluviométrique à partir de 1967 (Bodian 2014 ; Sambou et *al.*, 2018). Le tableau 9 montre les résultats du test de rupture de notre zone d'étude. Le test d'homogénéité a montré que la série pluviométrique analysée présente une rupture notée à partir de l'année 1975 avec une probabilité de 99% (tableau, 9). Cette rupture correspond à une diminution significative pluviométrie moyenne notée depuis la fin des années 1960.

**Tableau 9:** Résultats du test d'homogénéité de la pluviométrie à la station de Tambacounda (1951-2020)

Station	Statistiques (1951-2020)						Test de Pettitt	
	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Min/Max	Cv	Rupture	Probabilité
Tambacounda	433,6	1245,9	778,7	185,4	0,35	0,24	<b>1975</b>	99%

Cette situation nous a permis d'identifier deux périodes d'évolution de la pluviométrie à savoir la période humide et celle sèche (figure, 3).



**Figure 3 :** Test de Pettitt appliqué à la série pluviométrique annuelle de la station de Tambacounda (1951-2020)

La période humide (PH) se caractérise par la prédominance d'années à pluviométrie excédentaire par rapport à la moyenne. Elle s'établit entre 1951 et 1975 soit sur une durée de 25 ans. La période sèche (PS), plus longue, s'étend sur 45 ans (entre 1976 et 2020). Elle est marquée par la prédominance des années à pluviométrie déficitaire par rapport à la moyenne.

Nous avons ainsi déterminé le déficit pluviométrique entre ces deux périodes. Les résultats soulignent une baisse de la pluie moyenne de l'ordre de 18,3% après l'année 1975 (tableau 10).

**Tableau 10** : Déficit pluviométrique à la station de Tambacounda suivant le test de Pettitt (1951-2020)

Station de Tambacounda (1951-2020)	Référence	Avant la rupture		Après la rupture		Déficit (en %)
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
	1975	886,5	172,2	713,9	161,9	22,2

La combinaison des résultats obtenus avec le test de rupture de Pettitt et des indices d'anomalie pluviométrique permet de mieux cerner la variabilité de la pluviométrie à l'échelle annuelle.

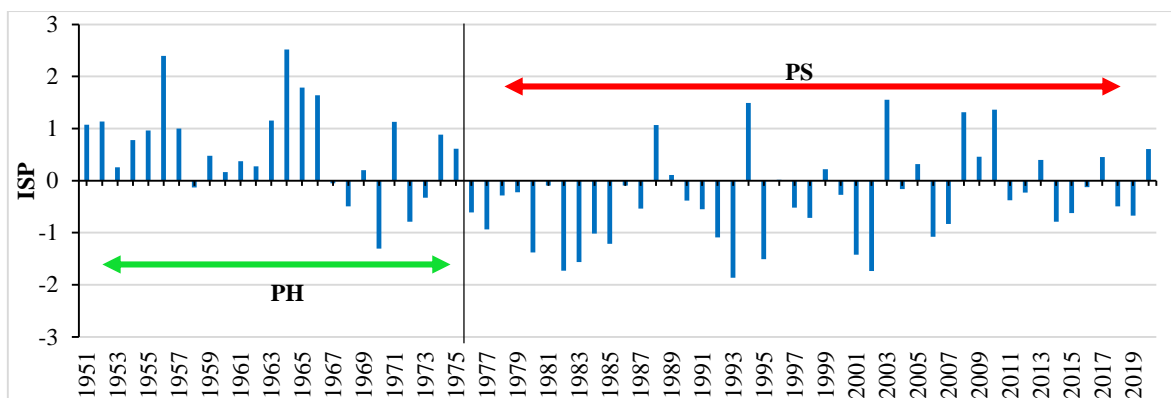
#### 2.2.2.2. Analyse de l'indice Standardisé de Précipitation (SPI)

Ces indices offrent la latitude d'estimer le déficit ou l'excédent de la pluviométrie à l'échelle annuelle (Lamb, 1982). De plus, cela nous permet d'avoir une vision plus claire des fluctuations interannuelles du régime pluviométrique (Ba et al., 2018). Cet indice exprime ainsi la différence entre le cumul pluviométrique d'une année et la pluviométrie moyenne de la série divisée par l'écart-type de l'année concernée. Il est déterminé par la formule suivante :

$$ISP = \frac{X_i - X_m}{\sigma}$$

Avec :  $X_i$  (mm) = cumul pluviométrique d'une année  $i$  ;  $X_m$  (mm) = pluviométrie moyenne de la série ; et  $\sigma$  = écart-type de la période.

La rupture issue des résultats du test d'homogénéité combinés aux indices d'anomalie pluviométriques nous a permis d'obtenir les résultats représentés sur la figure 4.



**Figure 4 :** Évolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Tambacounda (1951-2020) selon les ISP

La figure 4 transcrit globalement deux phases de l'évolution de la pluviométrie à la station de Tambacounda (entre 1951 et 2020). Ces deux phases sont séparées par la rupture qui intervient à partir de 1975.

La première phase correspond à la période humide qui s'étend entre 1951 et 1975, soit 25 ans. Nous notons dans cette période une importance des années à pluviométrie excédentaire par rapport à la moyenne. Les années excédentaires représentent 76% de la période humide avec deux (02) années extrêmement humides (1956 et 1964), deux (02) années très humides (1965 et 1966), cinq (05) années modérément humide (1951, 1952, 1957, 1963 et 1971) et dix (10) années proche de la normale si l'on se base sur la classification de l'OMM (2012). Nous notons également quelques années à pluviométrie déficitaire, soit 25% pour cette période avec une (01) année très sèche (1970) et cinq (05) années proche de la normale (1958, 1967, 1968, 1972 et 1973). La moyenne interannuelle de la pluie est égale à 886,5 mm pour cette phase.

La seconde phase est plus longue. Elle s'étale sur 45 ans (1976-2020) et correspond à la période sèche. La phase sèche se caractérise par la supériorité numérique des années à pluviométrie déficitaire par rapport à la moyenne. Nous ne notons pas d'année à sécheresse extrême dans cette phase si l'on se réfère à la classification de l'OMM (2012). Les années sont souvent modérées ou très sèches et parfois proche de la normale. En revanche, la phase sèche est affectée par onze (11) années excédentaires (1988, 1989, 1994, 1996, 1999, 2003, 2005, 2008, 2010, 2013 et 2017) soit une (01) année très humide (2003), quatre années modérément humide (1988, 1994, 2008 et 2010) et sept années (07) proche de la normale (1989, 1999, 2005, 2009, 2013, 2017, 2020). Dans cette phase, la moyenne interannuelle de la pluie est égale à 713,9mm.

L'évolution interannuelle de la pluie est alors marquée par une forte fluctuation qui laisse apparaître des irrégularités dans chaque phase. La tendance générale montre une évolution à la baisse. Cette baisse s'explique par la péjoration des conditions climatiques qui ont frappé tout le pays à partir de la décennie 1970. Nous notons également un retour vers des conditions plus humides à partir de l'année 2003.

### III. D'autres éléments du climat

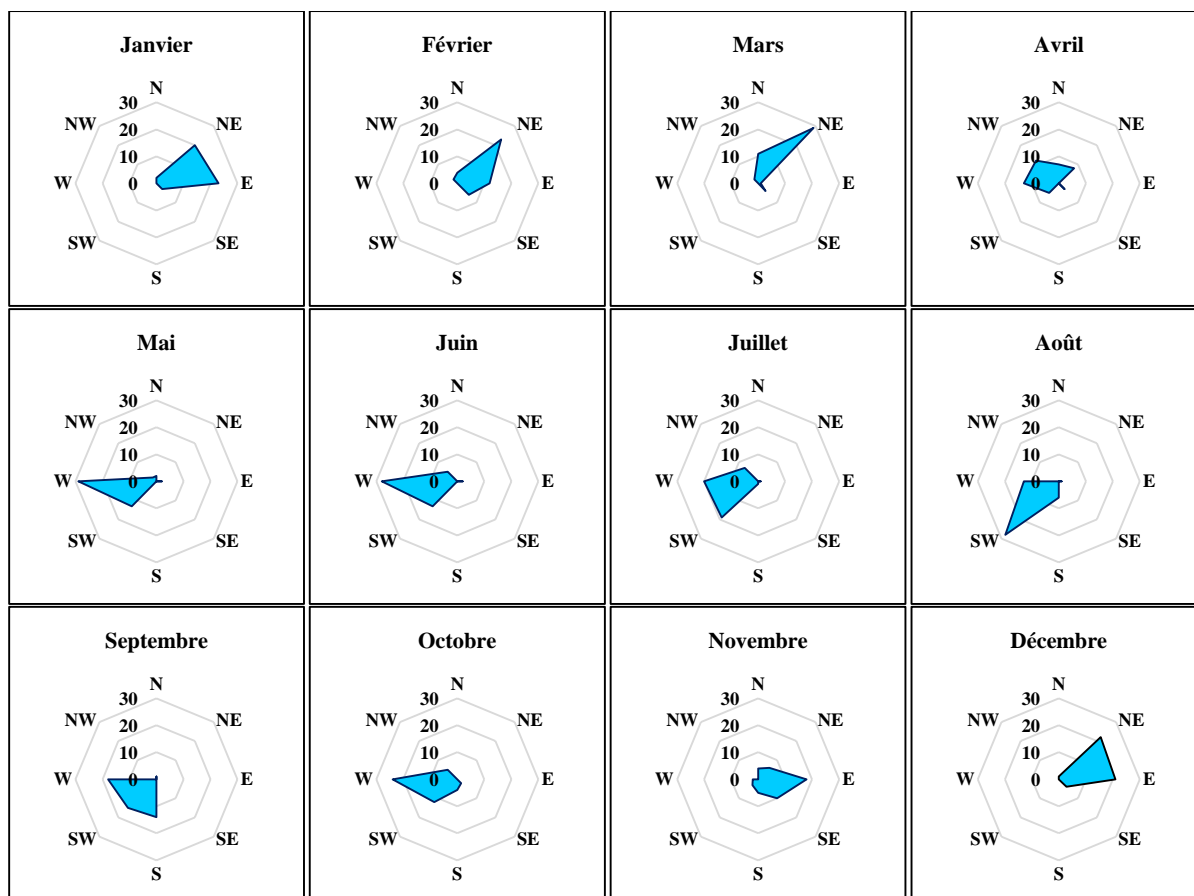
À cette étape de notre réflexion, nous analysons les vents, les températures, l'insolation, l'évaporation et l'humidité relative à la station synoptique de Tambacounda. Les données analysées dans cette partie sont également recueillies auprès de l'ANACIM. Ces paramètres précités sont importants dans l'analyse de l'évolution des ressources en eau. Les données sont regroupées dans le tableau 11 avec **TX** : températures maximales ; **TN** : températures minimales ; **TM** : températures moyennes ; **AT** : amplitude thermique ; **E** : évaporation ; **UN** : humidité relative minimale ; **UX** : humidité relative maximale ; **UM** : humidité relative moyenne ; **INS** : insolation.

**Tableau 11** : Données moyennes mensuelles et totales annuelles de quelques éléments du climat à la station de Tambacounda (1960-2020)

Mois	Vents d'Est	Vents d'Ouest	TX (°C)	TN (°C)	TM (°C)	AT	E (mm)	UN (%)	UX (%)	UM (%)	INS (heures)
Janv.	46	0	34,4	20,1	27,3	14,3	284,9	13,8	41	27,4	256,5
Févr.	41	2	37	19,9	28,5	17,2	294,3	12,8	39,6	26,2	252,6
Mars	34	2	39,2	22,7	30,9	16,6	334,3	13	41,2	27,1	282
Avr.	11	30	40,8	25	32,9	15,8	318,9	15	48,6	31,8	282,5
Mai	2	44	40,4	26,4	33,4	14	311,3	21,8	58,5	40,2	269,4
Juin	2	46	36,8	25,2	31	11,6	201,8	38,6	78,6	58,6	233
Juil.	1	46	33	23,5	28,2	9,4	105,7	55,9	90,3	73,1	223,8
Août	1	41	31,8	23	27,4	8,8	66,4	63,9	96,4	80,1	213,5
Sept.	0	33	32,7	22,6	27,6	10,1	56,2	61,1	96,4	78,8	224,9
Oct.	2	41	35,2	22,7	29	12,5	94,6	47,4	95,3	71,4	258,5
Nov.	34	5	36,9	19,5	28,2	17,4	181,9	22,3	78,5	50,4	259,4
Déc.	47	0	34,8	17,5	26,2	17,2	253,1	15,7	51,2	33,5	253,3
<b>AN</b>			<b>36,1</b>	<b>22,3</b>	<b>29,2</b>	<b>13,8</b>	<b>2503,4</b>	<b>31,8</b>	<b>68</b>	<b>49,9</b>	<b>3009,3</b>

#### 3.1 Les vents

L'analyse des vents s'est fait à partir des directions moyennes mensuelles des vents dominants et la vitesse moyenne (figure 5).



**Figure 5 :** Fréquences et directions de vents à la station de Tambacounda entre 1980 et 2020

Dans le bassin du Niaoulé, les vents d’Est dominent la circulation de novembre à mars (5mois) et les vents d’Ouest dominent la circulation le reste de l’année (7 mois). De novembre à mars, les vents du secteur Est sont plus fréquents avec 37% en novembre, 45% en décembre, 47% en janvier, 44% en février et 46% en mars. À partir du mois d’avril, les vents d’Ouest prennent la relève.

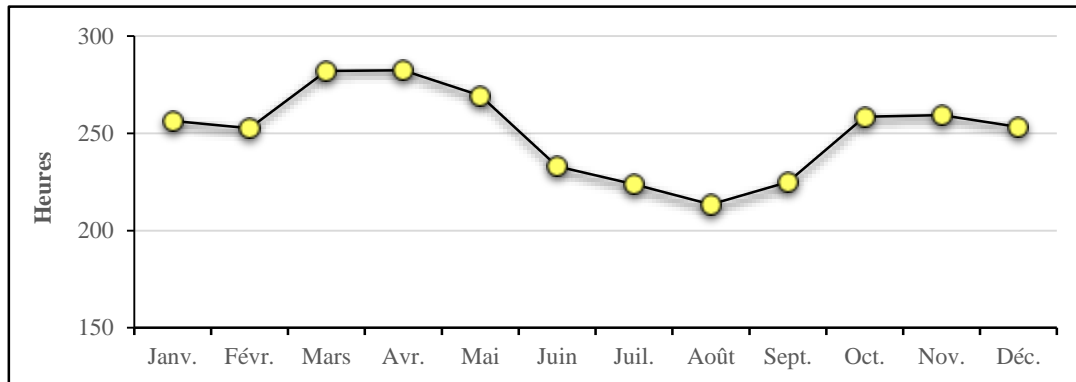
De plus, les résultats du tableau 12 montrent que les vitesses moyennes mensuelles des vents sont très fluctuantes. Le mois de décembre enregistre la vitesse la plus élevée avec 3,5 m<sup>3</sup>/s. La vitesse la plus faible est notée au mois d’octobre (2,5 m<sup>3</sup>/s).

**Tableau 12 :** Vitesses moyennes mensuelles du vent à Tambacounda entre 1980 et 2020

Station de Tambacounda (1980-2020)	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	AN
Nombre d’observations	41	40	41	41	41	41	41	41	38	39	38	39	41
Nombre d’observations manquantes	0	1	0	0	0	0	0	0	3	2	3	2	11
Vitesse (m <sup>3</sup> /s)	3,1	3,1	2,9	2,7	2,9	3,2	3,3	2,8	2,7	2,5	2,8	3,5	3,0

### 3.2. L'insolation

À la station de Tambacounda, les valeurs de l'insolation restent élevées et sont souvent supérieures à 213,5 heures par mois.



**Figure 6 :** Évolution de l'insolation moyenne mensuelle à la station de Tambacounda (1960-2020)

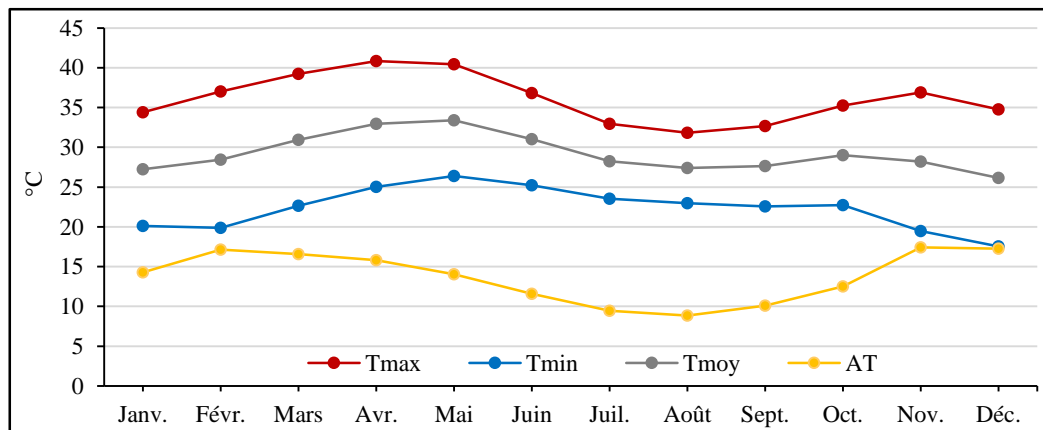
Toutefois, les valeurs d'insolation les plus élevées sont enregistrées entre février et mai avec un maximum qui intervient en avril (282,5 heures d'ensoleillement). Cette période est caractérisée par d'importants apports énergétiques sous l'absence de la pluie. Les plus faibles valeurs de l'insolation sont enregistrées pendant la saison pluvieuse notamment entre juin et septembre avec un minimum noté au cœur de l'hivernage (mois d'août avec 213,5 heures d'ensoleillement). Cette chute des valeurs de l'insolation est induite par l'importance de la couverture nuageuse qui survient en saison pluvieuse. Cependant, les valeurs de l'insolation recommencent à accroître à partir du mois d'octobre. Cet accroissement coïncide avec la fin de l'hivernage avec la faiblesse des pluies qui occasionne un rehaussement de l'ensoleillement. À partir du mois de décembre, nous observons une diminution relative qui se poursuit jusqu'en janvier. Cela peut s'expliquer par l'apparition des précipitations d'origine extratropicale (Sané, 2003).

### 3.3. Les températures

À en croire Leroux (1980), l'évolution des températures au Sénégal est souvent conditionnée par le mouvement apparent du soleil, la situation géographique et les facteurs météorologiques (précipitations, nébulosité, etc.).

Les températures sont globalement élevées dans la région avec une moyenne annuelle qui s'élève à 29,2°C. La courbe des températures maximales (TX) présente une évolution bimodale ; nous avons donc deux pics (figure 7). Le maximum et le minimum principal interviennent respectivement aux mois d'avril (40,8°C) et d'août (31,8°C). Le maximum secondaire est noté au mois de novembre avec 36,9°C et le minimum secondaire est noté en janvier (34,4°C). Les températures minimales (TN) ont aussi une évolution bimodale avec un maximum principal qui intervient au mois de mai avec 26,4°C. Le maximum secondaire est noté au mois d'octobre (22,7°C). Les minimums interviennent respectivement aux mois de janvier (14,3°C) et de septembre (22,6°C). L'évolution des températures moyennes suit celle des températures maximales et minimales. Globalement, nous pouvons retenir quatre phases suivant les valeurs de la température moyenne mensuelle : une phase très chaude qui s'étale de mars à juin ; une phase moyennement chaude située entre juillet et septembre ; une phase chaude comprise entre octobre et novembre et ; une phase relativement froide notée entre décembre et février où les températures commencent à croître.

Le caractère bimodal de l'évolution est également noté au niveau des amplitudes thermiques (AT). Ainsi, nous constatons que les amplitudes thermiques maximales surviennent au moment de la prédominance des vents d'est (saison non pluvieuse) ; alors que les minimas interviennent durant la saison pluvieuse domination des vents d'ouest (figure, 7).



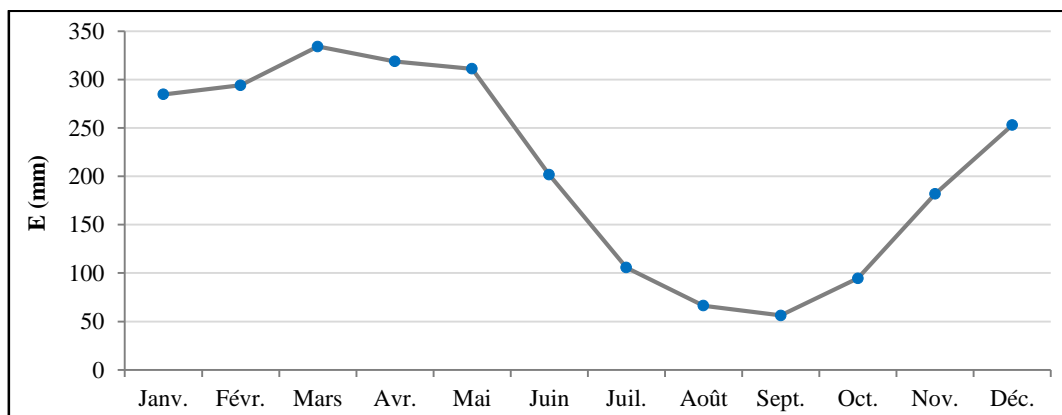
**Figure 7 :** Évolution des températures moyennes mensuelles à la station de Tambacounda (1960-2020)

Dans le bassin du Niaoulé, les températures sont globalement élevées. Cette élévation thermique s'explique surtout par la position continentale du bassin, mais également par l'importance de l'insolation et la prédominance de vent d'est.

### 3.4. L'évaporation

L'évaporation est un paramètre climatique qui occupe une place très importante pour les études hydrologiques. Elle participe à l'évaluation des disponibilités en eau d'un bassin dans la mesure où elle est assimilée aux pertes d'eau par sa transformation en vapeur. Or, l'analyse des disponibilités en eau repose essentiellement sur la différence entre les gains (pluviométrie) et les pertes dont l'évaporation constitue un paramètre déterminant. À la station de Tambacounda, elle présente une évolution relativement similaire à celle des températures. Cette situation constitue un élément justificatif de la corrélation existant entre ces deux paramètres climatiques.

L'évaporation maximale est enregistrée au mois de mars avec 334,3 mm ; alors que le minimum est noté en septembre avec 56,2 mm. La moyenne annuelle de la série (1960 – 2020) est égale à 208,6 mm. Nous constatons ainsi que les valeurs d'évaporation les plus élevées interviennent pendant la saison non pluvieuse (figure 8). Cela s'explique par la prédominance de l'Harmattan pendant cette période, car ce vent est doté d'un pouvoir évaporant très élevé. Les valeurs de l'évaporation diminuent avec la prédominance des vents d'ouest pendant la saison pluvieuse.



**Figure 8 :** Évolution moyenne mensuelle de l'évaporation à la station de Tambacounda entre 1960 et 2020

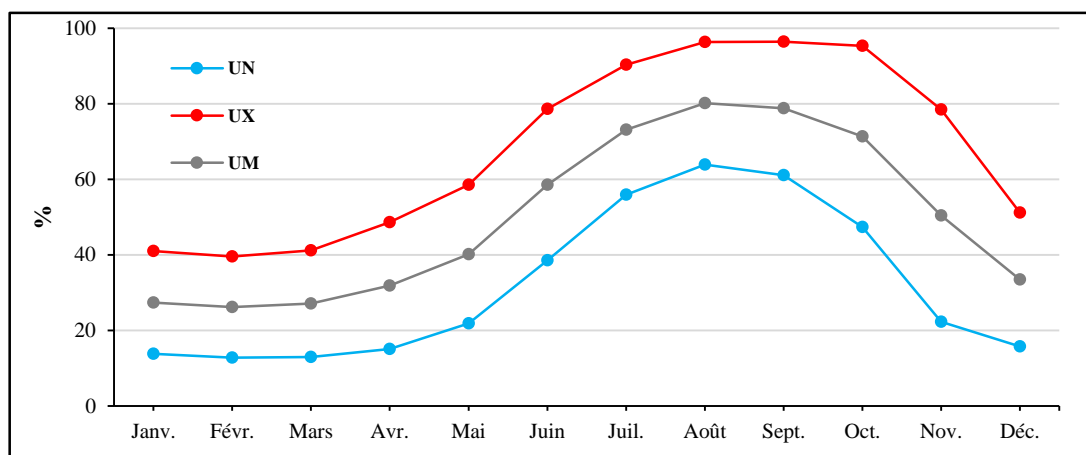
En outre, nous notons une forte conformité en l'insolation et l'évaporation. Cette conformité a été soulignée par d'autres chercheurs qui avancent l'idée selon laquelle le pouvoir évaporant est conditionné par le degré du rayonnement solaire (Dione, 1997 ; Sané, 2003). L'analyse des valeurs du tableau 11 montre que l'évaporation s'élève ou baisse de la même manière que l'insolation. Il en est de même pour les températures.



### 3.5. L'humidité relative

À la station de Tambacounda, nous pouvons noter des valeurs d'humidité relative faible avec une évolution unimodale. Les maximums interviennent en période de prédominance de vents d'Ouest et les minimums sont enregistrés pendant la prédominance des vents d'Est.

Le maximum maximorum est noté au mois de septembre (96,4%) et le maximum minimorum intervient au mois de février (39,6%). Le minimum maximorum apparaît en août (63,9%) et le minimum minimorum est enregistré en février avec 12,8% (figure 9). La moyenne annuelle est de 49,9%.

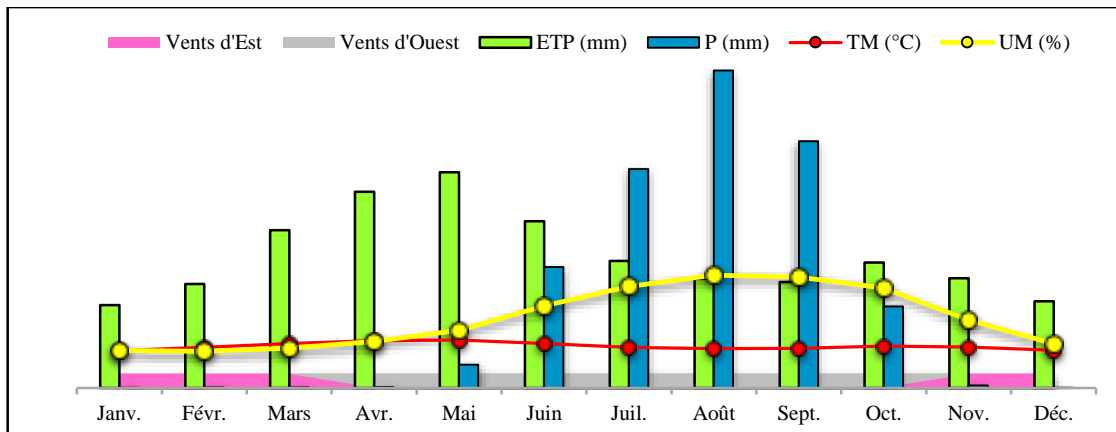


**Figure 9 :** Évolution de l'humidité relative à la station de Tambacounda entre 1960 et 2020

La combinaison des différents éléments du climat permet de situer le bassin du Niaoulé dans le domaine nord-soudanien continental conformément à la classification de Sagna (2008).

De novembre à avril, nous notons d'abord, la prédominance des vents d'Est accompagnée de fortes valeurs de température et d'évaporation. Ensuite, les valeurs de l'humidité relative sont plus faibles dans cette période et la pluviométrie est quasi nulle. Cette situation est due au règne de l'alizé continental qui impose ses caractéristiques (chaud et sec). C'est la saison non pluvieuse ou « saison sèche ».

En outre, entre mai et octobre, nous notons une domination des vents d'Ouest (la mousson) qui occasionnent une hausse de l'humidité du bassin (figure 10). De plus, l'essentiel des précipitations est enregistré durant cette période. Cela a d'ailleurs contribué à la chute des valeurs de la température et de l'évaporation. Cette période constitue la saison pluvieuse dite « hivernage ».



**Figure 10 :** Evolution combinée des éléments du climat à la station de Tambacounda (1960-2020)

### Conclusion partielle

Les différents éléments du climat analysés dans ce chapitre révèlent une alternance de phases sèches (saison non pluvieuse) et humides (saison pluvieuse). Le bassin du Niaoulé se caractérise par une pluviométrie très variable et se situe dans le régime Nord-soudanien (avec une pluviométrie comprise entre les isohyètes 500 mm et 1000 mm). L'analyse de l'homogénéité et de la tendance met en évidence une longue période de déficits pluviométriques inhérente à la persistance de la sécheresse observée à partir des années 1970. À cela s'ajoute la hausse des températures, de l'insolation et de l'évaporation d'une part et la diminution de l'humidité relative d'autre part. Toutefois, nous notons un retour vers des conditions pluviométriques plus humides à partir des années 2000. Les paramètres analysés constituent des éléments cruciaux dans l'analyse de l'écoulement fluvial en domaine tropical.

## **DEUXIÈME PARTIE : ÉCOULEMENT ET DISPONIBILITÉ EN EAU DU BASSIN VERSANT DU NIAOULE**

---

Dans cette partie, nous analysons les caractéristiques de l'écoulement du Niaoulé, affluent de rive droite de la Gambie. Ces caractéristiques sont déterminées à partir des résultats du traitement des données de la station hydrométrique de Niaoulé-Tanou qui contrôle l'ensemble du bassin. La station est suivie depuis 1970 et les valeurs des hauteurs d'eau traduites en débits couvrent une période de 24 ans (1970 – 1993). Toutefois à cause des nombreuses lacunes notées dans certaines années l'analyse s'est fait sur la période allant de 1971 à 1986. Ces données nous proviennent de la Direction Générale de Planification des ressources en eau du Sénégal (DGPRES).

## **Chapitre 3 : Le régime hydrologique et sa variabilité dans le bassin du Niaoulé**

---

D'une manière générale, le régime hydrologique est la réponse d'un bassin versant aux facteurs physiques stables et aux aléas climatiques (Faye, 2013). Il combine une ou des périodes :

- ✓ de montées des eaux, d'accroissement des débits, dites périodes de Hautes Eaux (HE) ;
- ✓ de décroissance des débits appelée périodes de Basses Eaux (BE).

Par conséquent, si un cours d'eau caractérisée par une seule période de HE et une seule période de BE de durée variable, le régime est dit unimodal, monomodal ou simple. S'il s'agit de plusieurs périodes de HE et de BE, le régime est soit bimodal (2 périodes de HE et de BE), soit plurimodal ou complexe.

### **I. Le régime fluvial dans le bassin du Niaoulé**

En zone tropicale, les cours d'eau à l'image du Niaoulé connaissent une alimentation exclusivement pluviale. C'est la raison pour laquelle l'année hydrologique débute au mois de mai et se termine en avril notamment huit mois d'une année légale et quatre mois de l'année suivante.

L'année hydrologique est la période de 12 mois (1an) comprise entre deux périodes de basses eaux successives. Elle peut être différente de l'année légale qui commence en janvier et se termine en décembre. Dans les bassins tropicaux les basses eaux interviennent en fin saison sèche et entre avril et mai. Ainsi, l'année hydrologique commence le 1er mai et se termine le 30 avril de l'année suivante notamment 8 mois de l'année légale et 4 mois de l'année suivante (Exemple : 1971-1972). Ces variations mensuelles, durant l'année hydrologique, étudiées sur une longue période donnent le régime hydrologique moyen d'un cours d'eau.

La définition des variations saisonnières systématiques d'un cours d'eau se fait avec la moyenne des débits mensuels calculés sur une longue période donnée. L'étude du régime hydrologique nécessite la détermination préalable des coefficients mensuels de débit (CMD). Le CMD est le rapport entre le débit d'un mois considéré et le débit moyen annuel. Les coefficients mensuels vont nous permettre de définir les périodes de hautes eaux (HE) et les périodes de basses eaux (BE). Ainsi, en se basant sur la classification de Pardé (1968), un CMD supérieur ou égal 1 correspond à une période de hautes eaux et un CMD inférieur à 1 est assimilé à une période de

basses eaux. De plus, Sow (2007) et Faye (2013) précisent qu'en zone tropicale où l'alimentation est exclusivement pluviale, quatre régimes peuvent être identifiés en fonction de la latitude et du nombre de mois de hautes eaux. Il s'agit du :

- ✓ régime guinéen marqué par cinq mois de hautes eaux (3° 53' et 9° 15'N) entre juin ou juillet et novembre ou décembre gardant une tendance bimodale ;
- ✓ régime tropical de transition caractérisé par quatre mois de hautes eaux (8° 07' et 12° 51' N) entre juillet et octobre gardant une tendance monomodale ;
- ✓ régime tropical pur avec trois mois de hautes eaux (12° 51' et 14° 54'N) entre août et octobre pour une tendance unimodale ;
- ✓ régime sahélien de deux mois de hautes eaux (au-delà de 15° N), en août et septembre.

Les caractéristiques permettant d'analyser le régime du Niaoulé sont données dans le tableau 13.

**Tableau 13** : Périodes de hautes et de basses eaux en fonction du coefficient mensuel de débit CMD (1971-1986)

Station de Niaoulé-tanou	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	AN
Débits moyens mensuels (m <sup>3</sup> /s)	0	0	0	0	0,05	0,38	0,86	0,64	0,62	0,17	0,01	0,004	0,23
CMD	0	0	0	0	0,22	1,68	3,77	2,81	2,73	0,73	0,04	0,02	1
Période	Basses eaux					Hautes eaux			Basses eaux				

Le tableau ci-dessus laisse entrevoir la faiblesse et la modicité des débits du Niaoulé durant la période 1970-1993. Il apparaît clairement que les débits moyens mensuels sont inférieurs à 1m<sup>3</sup>/s. L'analyse des CMD révèle dans sa globalité une période de hautes eaux qui s'étale sur quatre (04) mois (juin, juillet, août et septembre) et une période de basses eaux qui s'observe sur les huit mois restants de l'année hydrologique (mai, octobre, novembre, décembre, janvier, février, mars et avril). Il s'agit du régime fluvial tropical de transition. Toutefois, en se basant sur la latitude du bassin, le régime du Niaoulé correspondrait à un régime fluvial tropical pur. D'ailleurs, certaines études (Sow, 2006 ; Sow, 2008) ont montré que le régime hydrologique du Niaoulé est de type fluvial tropical pur malgré le fait que le nombre de mois de hautes eaux soit égal à quatre (04).

L'étude du régime moyen, de sa variabilité et de l'évolution journalière nous permettra d'analyser l'écoulement dans le régime fluvial tropical de transition.

## 1.1. Le régime moyen

L'analyse du régime fluvial tropical de transition s'est faite avec les données de la station de Niaoulé-Tanou. Ainsi, le régime laisse entrevoir une phase de montée des eaux qui part du mois d'avril au mois de juillet et une période de descente des eaux qui débute dès le maximum (juillet) et se prolonge jusqu'en avril (tableau 14).

Tableau 14 : Evolution des débits moyens mensuels (DMM) et des CMD à Niaoulé (1971-1986)

Mois	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	AN
Débits moyens mensuels (m <sup>3</sup> /s)	0,05	0,38	0,86	0,64	0,62	0,17	0,01	0,004	0	0	0	0	0,23
CMD	0,22	1,68	3,77	2,81	2,73	0,73	0,04	0,02	0	0	0	0	1
Évolution brute	0,05	0,334	0,477	0,22	0,019	0,456	0,158	0,005	0,004	0	0	0	
Évolution en %	5,78	38,85	55,37	25,51	2,16	52,92	18,36	0,57	0,48	0	0	0	

### 1.1.1. La phase de montée des eaux

Elle s'étend d'avril à juillet avec un débit passant de 0 m<sup>3</sup>/s (avril) à 0,86 m<sup>3</sup>/s (juillet), soit un accroissement de 0,86 m<sup>3</sup>/s.

D'avril à mai, le débit passe de 0 m<sup>3</sup>/s à 0,05 m<sup>3</sup>/s, soit une hausse de 5,78% en valeur relative. Cela marque une annonce du début de la saison des pluies.

Entre mai et juin, le débit augmente de 0,334 m<sup>3</sup>/s, soit 38,85% par rapport au mois de mai. Cette croissance relative du débit justifie l'installation de la saison pluvieuse.

De juin à juillet, nous notons une importante hausse du débit qui passe de 0,384 m<sup>3</sup>/s (juin) à 0,86 m<sup>3</sup>/s (juillet), soit 55,37% en valeur relative. Cette période, appelée pointe de crue, intervient au moment où les conditions climatiques sont favorables dans tout le bassin, notamment lorsque la pluviométrie est importante et l'évaporation est faible. La figure 11 constitue une illustration aussi bien pour la phase de montée que pour la phase de descente des eaux.

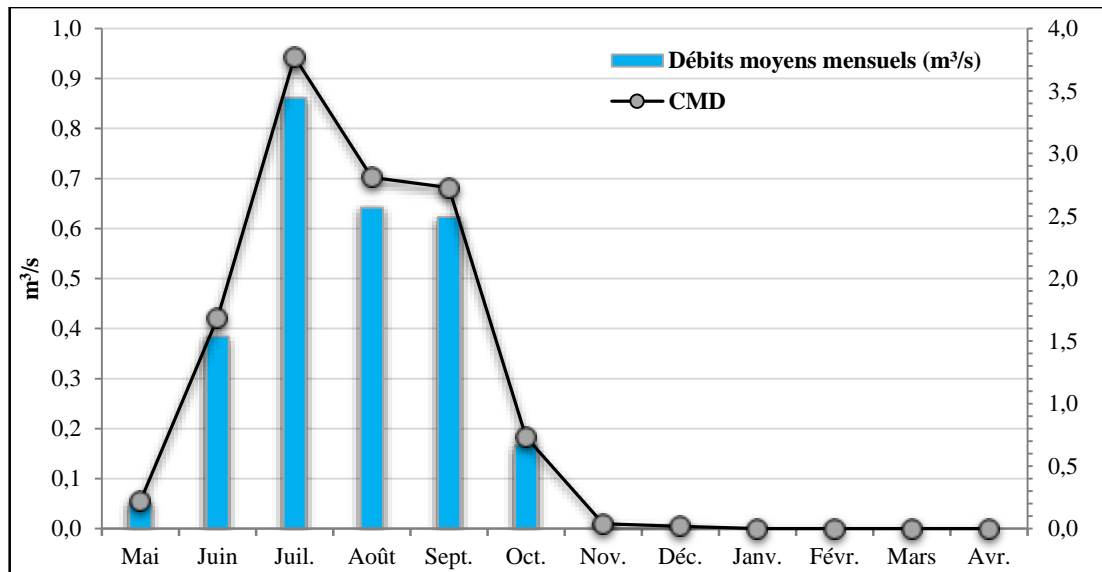


Figure 11 : Evolution comparée des CMD et DMM à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

### 1.1.2. La phase de descente des eaux

La descente des eaux commence dès le maximum (juillet). Ainsi, entre juillet et août le débit est passé de  $0,86 \text{ m}^3/\text{s}$  (juillet) à  $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$  (août), soit une baisse de  $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Entre août et septembre, nous constatons une légère diminution de  $0,009 \text{ m}^3/\text{s}$  du débit, soit 1% en valeur brute. De septembre à octobre, nous observons une importante chute du débit qui passe de  $0,623 \text{ m}^3/\text{s}$  (septembre) à  $0,167 \text{ m}^3/\text{s}$  (octobre) soit une baisse drastique de  $0,456 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette baisse qui est de l'ordre de 52,92% coïncide avec le retrait dû FIT dans le bassin, annonçant ainsi la fin de la saison pluvieuse. Le débit diminue de 18,36% entre octobre et novembre, soit une baisse de  $0,157 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette diminution du débit est aussi constatée entre novembre et décembre ainsi qu'entre décembre et janvier avec respectivement des chutes de 0,8% et 0,7%. Entre juillet et octobre, le débit du Niaoulé est passé de  $0,86 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $0,167 \text{ m}^3/\text{s}$  soit une baisse de 80,59%. Cette baisse conjuguée à celle qui intervient entre octobre et novembre (18,36%), laisse entrevoir une importante diminution du débit de l'ordre de 98,95%. Le débit devient nul aux mois de janvier, février, mars et avril. Ce qui justifie le caractère temporaire de l'écoulement du Niaoulé.

La courbe de montée des eaux du Niaoulé est constituée par trois (03) mois (Mai, Juin et Juillet) d'où une évolution rapide ; alors que celle de descente, plus lente, est constituée par neuf (09)

mois (de juillet à avril). En outre, nous constatons qu'il existe une corrélation entre la pluviométrie et le débit écoulé (figure 12).

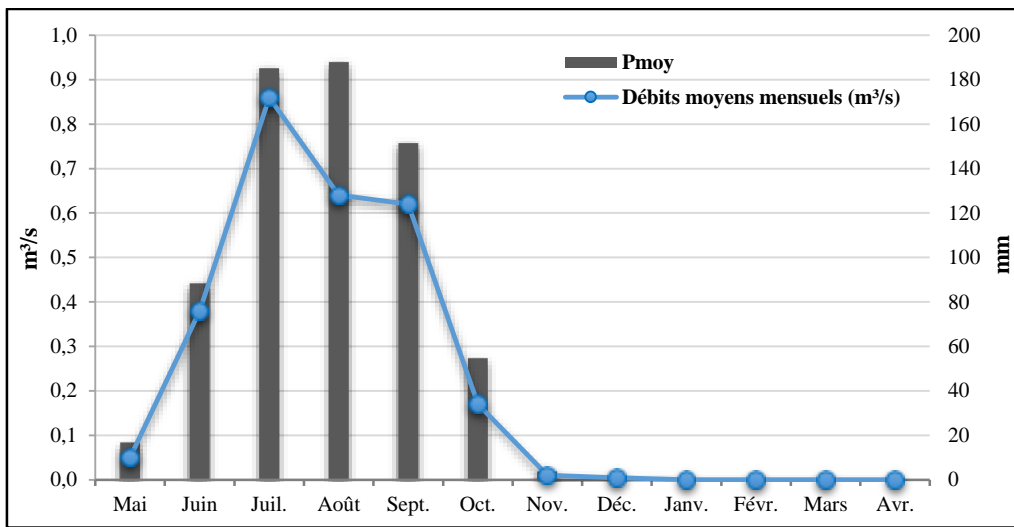


Figure 12 : Évolution moyenne mensuelle des débits et de la pluviométrie dans le bassin du Niaoulé entre 1971 et 1986

## 1.2. La variabilité du régime hydrologique moyen du Niaoulé

La variabilité de l'écoulement dans le bassin du Niaoulé peut être appréhendée à l'échelle journalière, saisonnière et annuelle.

### 1.2.1. La variabilité journalière de l'écoulement du Niaoulé

La variabilité de l'écoulement à l'échelle journalière peut être perçue à travers l'analyse des débits moyens journaliers (figure 13).

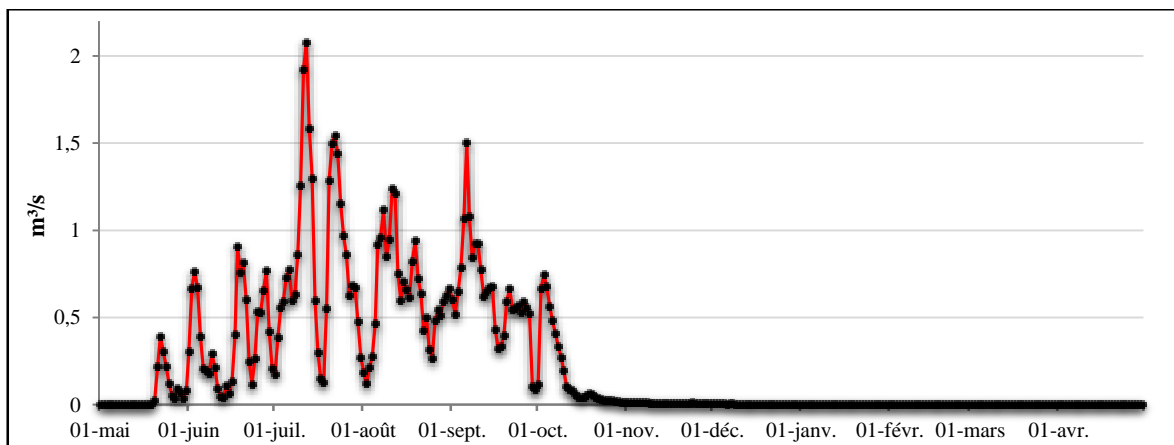


Figure 13 : Évolution des débits moyens journaliers à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986)



Les débits moyens journaliers sont globalement faibles à cause du cumul d'années sèches enregistrées pendant cette période. Cela justifie d'ailleurs le tarissement précoce du cours d'eau et la faiblesse des recharges de la nappe. L'hydrogramme de crue laisse apparaître une évolution très fluctuante (figure 13). Toutefois nous pouvons distinguer trois périodes à savoir la phase de montée (courbe de montée), la phase de descente (courbe de descente) et celle de tarissement (courbe de tarissement).

### 1.2.1.1. La courbe de montée

L'évolution de la courbe de crue est très irrégulière ; elle est marquée par plusieurs fausses crues. La courbe débute à partir du 20 mai avec un débit de  $0,027 \text{ m}^3/\text{s}$  et se termine à la pointe de crue qui correspond au 12 juillet avec  $2,08 \text{ m}^3/\text{s}$ . La crue est ainsi médiocre avec une puissance égale à  $0,06$ . La courbe de montée s'étale sur 54 jours (tableau 15).

**Tableau 15 :** Caractéristiques de la courbe de montée à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986)

<b>Crue moyenne</b>			<b>1971-1986</b>
Date			12-juil
Valeur			$2,08 \text{ m}^3/\text{s}$
Puissance			0,06
<b>Courbe de montée</b>	Début	Date	20-mai
		Débit	$0,027 \text{ m}^3/\text{s}$
	Fin	Date	12-juil
		Débit	$2,079 \text{ m}^3/\text{s}$
	Durée		54 jours

### 1.2.1.2. La courbe de descente

La courbe de descente continue l'évolution des débits moyens journaliers en suivant la courbe de crue. Elle commence après le pic (12 juillet) avec  $2,08 \text{ m}^3/\text{s}$  et décroît jusqu'au 3 octobre ( $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (tableau, 16).

**Tableau 16 :** Caractéristiques de la courbe de descente à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986)

<b>Courbe de descente</b>	Début	Date	12-juil
		Débit	$2,08 \text{ m}^3/\text{s}$
	Fin	Date	03-oct
		Débit	$0,75 \text{ m}^3/\text{s}$
	Durée		83 jours

La durée de l'étiage est égale à 83 jours en moyenne ; ce qui traduit un soutien faible en saison sèche. La courbe d'étiage se présente également très irrégulière.

### 1.2.1.3. La courbe de tarissement

Cette courbe présente une évolution régulière à cause de la décroissance progressive du débit moyen journalier due à l'absence de soutien des étiages. Le tarissement moyen débute ainsi au 3 octobre avec  $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$  et se prolonge jusqu'au 20 mai, date de début de la courbe de montée. Le Niaoulé tarit ainsi pendant 229 jours soit un coefficient de tarissement de 0,036 et un volume de soutien des nappes de  $20,74 \text{ m}^3$  (tableau 17). Sachant que l'écoulement est saisonnier, nous avons pu déterminer la durée pendant laquelle l'écoulement est nul. Cette dernière qui est égale à 139 jours témoigne de la faiblesse de l'écoulement du Niaoulé et de l'importance du tarissement.

**Tableau 17 :** Caractéristiques de la courbe de descente à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986)

<b>Courbe de tarissement</b>	Début	Date	03-oct
		Débit	$0,75 \text{ m}^3/\text{s}$
	Fin	Date	20 mai
		Débit	$0,03 \text{ m}^3/\text{s}$
	Durée		229 jours
	Coefficient de tarissement (K)		0,036
Volume de soutien des nappes		$20,74 \text{ m}^3$	
<b>Écoulement saisonnier</b>			
Date de début des débits nuls		01-janv	
Date de fin des débits nuls		19-mai	
Temps où l'écoulement est à sec		139 jours	

L'analyse des débits moyens journaliers révèle dans sa globalité une évolution très variable marquée par l'alternance de séquences positives et négatives. Nous observons plusieurs fausses crues et le coefficient de variation est relativement élevé avec une valeur de 1,6. Cette variabilité de l'écoulement à l'échelle journalière est également perceptible sur d'autres échelles plus grandes.

### 1.2.2. La variabilité saisonnière de l'écoulement du Niaoulé

La variabilité saisonnière de l'écoulement est normalement liée à celle de la pluviométrie qui constitue l'unique mode d'alimentation en eau dans le bassin du Niaoulé (figure 12). Elle peut être perçue à travers l'analyse des coefficients de variation. Le coefficient de variation minimum est enregistré au mois de décembre (0,1) ; alors que le maximum est noté en septembre (4,1). La variabilité est plus accentuée durant la période de hautes eaux (juin, juillet, août et septembre) à cause de l'irrégularité des apports pluviaux. Durant cette période, les coefficients varient entre 1,9 et 4,1 ; ce qui est très élevé.

La période de basses eaux montre une variabilité plus faible avec des coefficients qui varie entre 0 et 1,9 (tableau 18). Cette variation est due à l'importance des fluctuations de la pluviométrie qui est faible et irrégulière pendant cette période. Toutefois, nous notons globalement une importante variabilité des mois de l'année hydrologique d'autant plus que les coefficients de variation sont élevés.

**Tableau 18 :** Caractéristiques de l'écoulement moyen mensuel à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

Mois	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	AN
<b>Débits moyens mensuels (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,05	0,38	0,86	0,64	0,62	0,17	0,01	0,004	0	0	0	0	0,23
<b>CMD</b>	0,22	1,68	3,77	2,81	2,73	0,73	0,04	0,02	0	0	0	0	1
<b>Ecart type</b>	0,13	0,44	0,71	0,81	0,94	0,43	0,03	0,02	0	0	0	0	0,2
<b>Coefficient de variation</b>	0,6	1,9	3,1	3,5	4,1	1,9	0,2	0,1	0	0	0	0	0,8
<b>Période</b>	Basses eaux	Hautes eaux				Basses eaux							
<b>Débuts de l'écoulement (%)</b>	20	73,3	6,7										100
<b>Fins de l'écoulement (%)</b>						40	47	13					100

La variabilité saisonnière peut également être perçue à travers l'analyse de la fréquence des débuts et fins de l'écoulement. Le tableau 18 indique que dans le bassin du Niaoulé, l'écoulement débute le plus souvent au mois de juin (73,3%). Il peut parfois débiter au mois de mai (20%) et rarement en juillet (6,7%). L'écoulement s'achève le plus souvent en octobre (40%) ou en novembre (47%) et très rarement en décembre (13%). Cette variabilité de l'écoulement renforce la thèse de la corrélation qui existe entre la pluviométrie et l'hydrométrie.

### 1.2.3. La variabilité annuelle de l'écoulement du Niaoulé

La variabilité annuelle de l'écoulement du Niaoulé peut être appréhendée à travers l'analyse des années extrêmes et des coefficients d'hydraulicité.

#### 1.2.3.1. La variabilité interannuelle de l'écoulement à Niaoulé

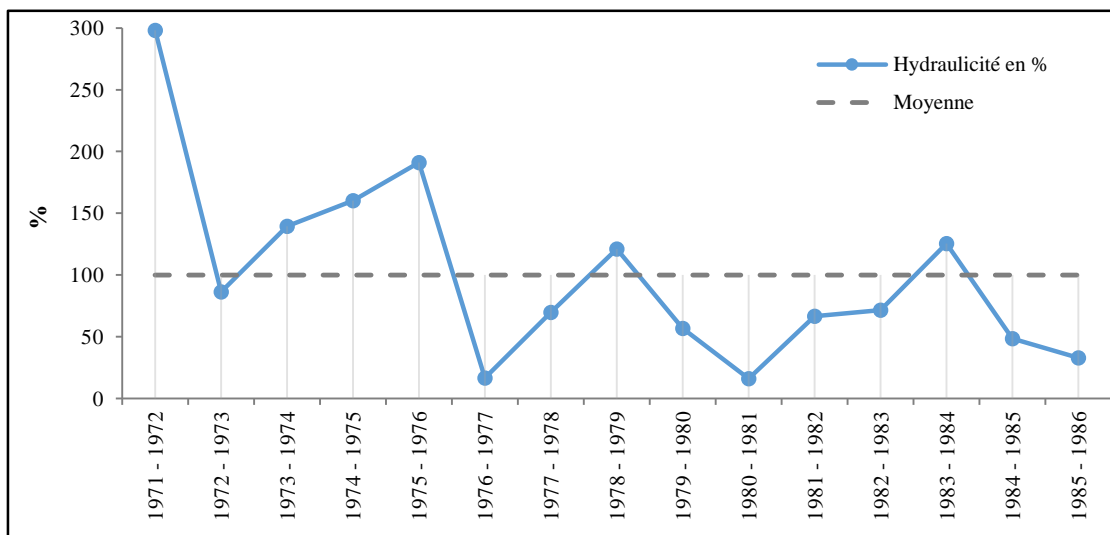
Pour analyser la variabilité interannuelle de l'écoulement dans le bassin, nous avons eu recours à l'hydraulicité. Cela nous permet de constater les fluctuations interannuelles de l'écoulement et de montrer les années déficitaires et celles excédentaires par rapport à la moyenne. L'hydraulicité est le quotient issu du rapport en pourcentage entre le débit moyen d'une année et le module moyen de toute la série (tableau 19).

**Tableau 19 :** Hydraulicité en pourcentage à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

<b>Années hydrologiques</b>	<b>Module moyen annuel (en m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Hydraulicité (en %)</b>
1971 - 1972	0,68	298,1
1972 - 1973	0,20	86,4
1973 - 1974	0,32	139,4
1974 - 1975	0,37	160,2
1975 - 1976	0,44	191,0
1976 - 1977	0,04	16,7
1977 - 1978	0,16	69,6
1978 - 1979	0,28	120,9
1979 - 1980	0,13	56,8
1980 - 1981	0,04	16,1
1981 - 1982	0,15	66,5
1982 - 1983	0,16	71,4
1983 - 1984	0,29	125,6
1984 - 1985	0,11	48,5
1985 - 1986	0,07	32,8
<b>Moyenne de la série</b>	<b>0,23</b>	<b>100</b>

Le tableau 19 montre que six (06) années ont une hydraulicité supérieure à 100% soit un pourcentage de 40% par rapport à la série (1971-1986). Ces années correspondent à celles dotées une bonne pluviosité et des conditions de perte moins importante. Les années à hydraulicité déficitaire représentent 60% de la série. L'hydraulicité maximum est notée à l'année humide 1971-1972 (298,1%) et celle plus faible est enregistrée à l'année sèche 1980-1981 (16,1%).

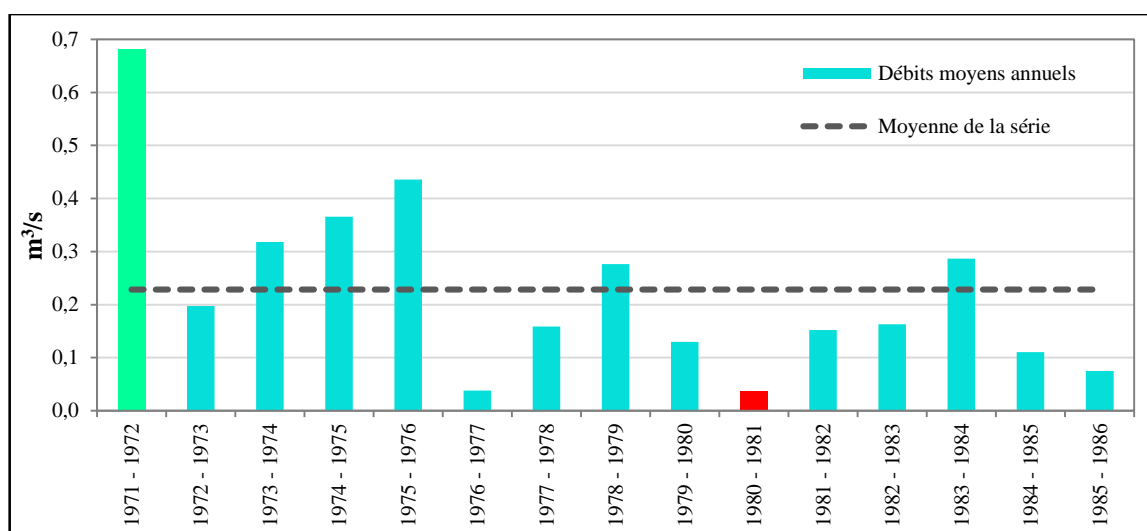
De plus, il ressort de cette analyse une concordance entre la pluviométrie interannuelle et l'écoulement à travers le paramètre d'hydraulicité. En effet, nous constatons que le début de la série (1971 à 1975) est marqué par la prédominance des années excédentaires (figure 14). Ces dernières sont au nombre de quatre (04) et englobent 66,7% des années à excédent de la série. Cette période correspond à la période humide notée dans l'analyse de la variabilité interannuelle de la pluie. La seconde phase (1976 à 1986) correspond à la période sèche avec une prédominance d'années à hydraulicité déficitaire soit une proportion de 88,9% des années déficitaires de la série. Ce déficit peut s'expliquer par l'importante baisse de la pluviométrie inhérente à la sécheresse des années 70. Par conséquent, si nous nous basons sur cette hypothèse, nous pourrions considérer que le retour vers des conditions plus humides à partir des années 2000 pourrait s'avérer. D'ailleurs cette thèse serait considérée dans le cadre de cette étude d'autant plus que les données hydrométriques ne sont disponibles que pour cette période à la station de contrôle du bassin du Niaoulé.



**Figure 14 :** Évolution de l'hydraulicité à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

### 1.2.3.2 La variabilité annuelle des années extrême dans le bassin du Niaoulé

La figure 15 met en exergue les débits moyens annuels pour chacune des années hydrologiques de la série.



**Figure 15 :** Débits moyens annuels à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

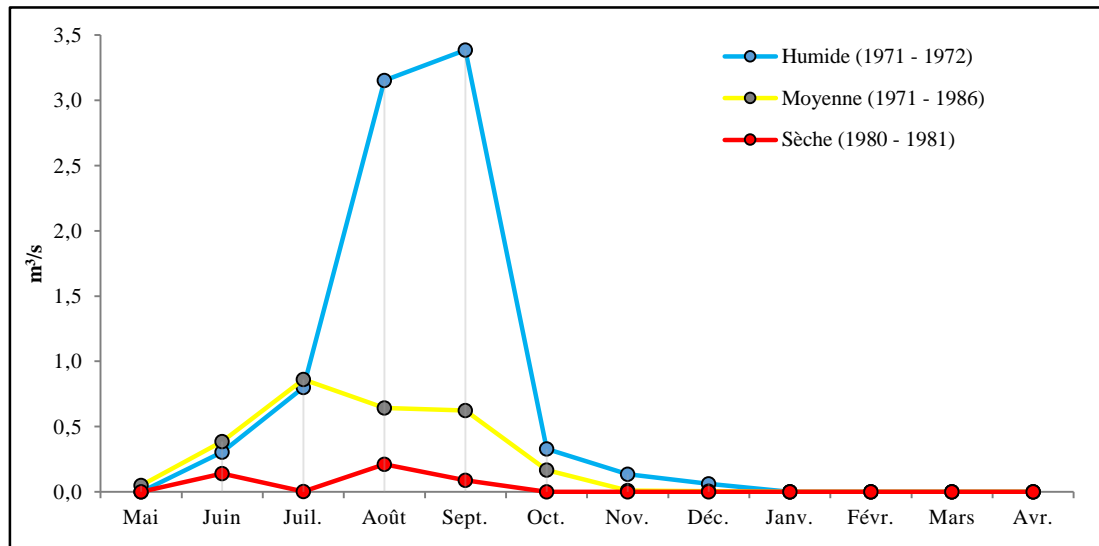
Ainsi, nous pouvons très bien constater que l'année hydrologique 1971-1972 constitue l'année la plus humide ( $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ; alors que l'année 1980-1981 est la plus sèche ( $0,037 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Cette identification nous permet de voir l'écart qui existe entre l'année la plus abondante en écoulement et l'année la plus sèche. Les valeurs de débits mensuels des années extrêmes sont données dans le tableau 20.

**Tableau 20 :** Débits moyens mensuels ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) des années extrêmes à la station de Niaoulé-Tanou (1971 – 1986)

Station de Niaoulé-Tanou	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	AN	Écart (%)
<b>Année humide (1971 - 1972)</b>	0	0,30	0,80	3,15	3,39	0,33	0,14	0,06	0	0	0	0	0,68	198
<b>Moyenne (1971 - 1986)</b>	0,05	0,38	0,86	0,64	0,62	0,17	0,01	0,004	0	0	0	0	0,23	0
<b>Année sèche (1980 - 1981)</b>	0	0,14	0,002	0,21	0,09	0	0	0	0	0	0	0	0,04	-84

L'écart à la moyenne calculé pour ces deux années montre un grand fossé qui témoigne d'une variabilité non-négligeable du régime. L'année humide (1971-1972) enregistre une proportion de 198 % par rapport à la moyenne sérielle ; alors que l'année sèche (1980-1981) est marquée par un déficit de l'ordre de 84 % (tableau 20). Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'année humide soit marquée par des conditions pluviométriques plus importantes et des pertes plus faibles. En outre, nous notons aussi que même si le maximum de l'année humide est enregistré au mois de septembre ( $3,39 \text{ m}^3/\text{s}$ ), les débits notés en juin, juillet, août et octobre sont

supérieurs au maximum de l'année sèche perçue en août avec  $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$ . Toutefois, nous remarquons que malgré l'importance des débits écoulés, l'année humide enregistre trois mois de hautes eaux alors que la moyenne de la série en enregistre quatre. Ce constat est également noté pour l'année sèche. Cette situation révèle ainsi une variabilité interannuelle du régime dans le bassin versant du Niaoulé. La figure 16 illustre l'évolution des années extrêmes.



**Figure 16 :** Évolution moyenne mensuelle des années extrêmes à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

## II. L'analyse des phénomènes extrêmes de l'écoulement

### 2.1. Les crues

D'une manière générale, la crue est conçue comme un phénomène extrême de l'écoulement d'un cours d'eau qui se traduit par une hausse brusque des débits (Office Internationale de l'eau, 2019). En zone tropicale, elle correspond au débit maximum journalier enregistré sur une année hydrologique, au cours de la période de hautes eaux. Toutefois, il ne faudrait pas confondre la crue avec cette période compte tenu des différences notées à propos de leur fréquence, leur durée et la valeur des débits écoulés (Frécaut, 1982 ; Sow, 2007).

#### 2.1.1. Les dates d'apparition des crues

Les modalités de l'écoulement fluvial sont principalement conditionnées par les facteurs climatiques. Par conséquent, les débits maximums journaliers doivent normalement survenir après le maximum de la pluviométrie lorsque les températures et l'évaporation diminuent. Dans ces conditions climatiques l'atmosphère est saturée d'humidité de même que les sols. Par

conséquent, les chutes de pluie ruissellent et élèvent les valeurs de débits écoulés. À la station de Niaoulé-Tanou, les dates d'apparition des crues (Dmax) sont réparties entre 3 mois à savoir juillet, août et septembre. Cette période est scindée en décades dans l'optique de calculer la fréquence des dates d'apparition de la crue dans le bassin (tableau 21).

**Tableau 21** : Fréquences d'apparition des crues (Dmax) à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

Décades	1 <sup>er</sup> au 10 juil.	11 au 20 juil.	21 au 31 juil.	1 au 10 août	11 au 20 août	21 au 31 août	1 <sup>er</sup> au 10 sept	11 au 20 sept.	21 au 30 sept.	Total
Effectif décade	1	4	3	2	2	0	1	1	1	15
Fréquence décade (%)	6,7	26,6	20	13,3	13,3	0	6,7	6,7	6,7	100
Effectif mensuel	8			4			3			15
Fréquence mensuelle (%)	53,3			26,6			20,1			100
Caractère de la crue	Précoce	Normale				Tardive				

À la station de Niaoulé-Tanou, les crues sont plus fréquentes au mois de juillet (53,3%). La seconde (du 11 au 20 juillet) et la troisième décade (du 21 au 30 juillet) enregistrent respectivement 26,6% et 20,1% des crues de la série de 1971 à 1986. Les débits maximums journaliers sont moins fréquents à la première décade (du 1<sup>er</sup> au 10 juillet) qui totalise 6,7%. Le mois de septembre est suivi du mois d'août qui totalise une fréquence de 27% répartie de manière égale entre ses deux premières décades (13,3% chacun). Au mois de septembre, les crues enregistrent une fréquence totale de 20,1% dont 6,7% pour chaque décade. Nous constatons que les crues du bassin du Niaoulé enregistrent une fréquence nulle à la troisième décade du mois d'août (du 21 au 31 août). Ainsi, les crues sont globalement précoces et peuvent être caractérisées comme suit :

- du 1<sup>er</sup> au 10 juillet : phase de concentration ;
- du 11 juillet au 20 août : pointe de crue ;
- à partir du 31 août jusqu'en septembre : phase de décrue.

### 2.1.2. La variabilité interannuelle des crues

La variabilité interannuelle des Dmax peut être analysée par le biais des quelques paramètres statistiques à l'image du coefficient de variation, l'écart entre le maximum et le minimum, et le

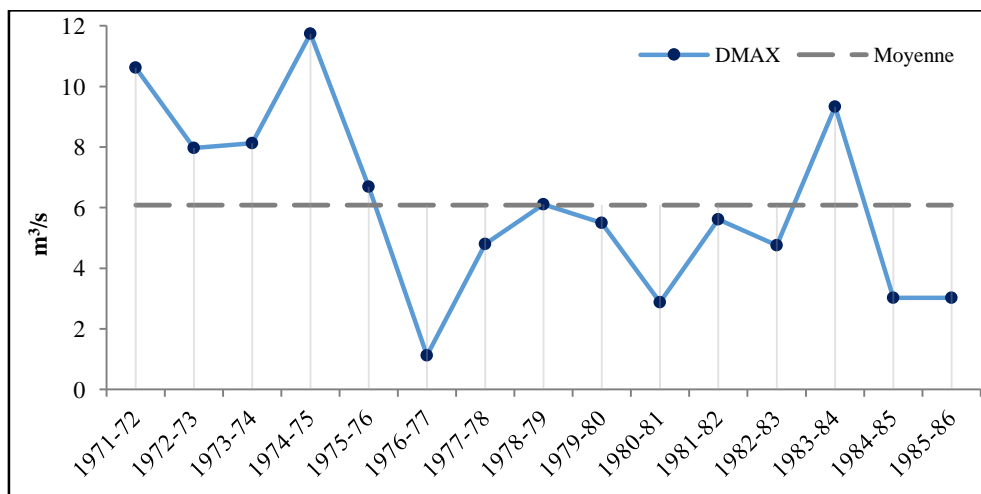


coefficient de puissance de crue. Ces paramètres sont donnés dans le tableau 22 pour la station de Niaoulé-Tanou.

**Tableau 22 :** Caractéristiques de la variabilité interannuelle des DMAX à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

Station de Niaoulé-Tanou	Dmax (m <sup>3</sup> /s)	Puissance de crue
<b>Moyenne</b>	6,09	0,17
<b>Écart-type</b>	3,03	0,09
<b>Coefficient de variation</b>	0,5	0,5
<b>Maximum de la série</b>	11,74	0,33
<b>Minimum de la série</b>	1,12	0,03
<b>Écart de la série</b>	10,62	0,30

Le coefficient de variation (0,5) traduit une forte variabilité des crues d'une année hydrologique à l'autre. Le maximum de la série (11,74 m<sup>3</sup>/s) est noté sur l'année hydrologique 1974-1975 ; alors que le minimum (1,12 m<sup>3</sup>/s) intervient en 1976-1977. Par conséquent, l'écart entre le maximum et le minimum est de 10,62 m<sup>3</sup>/s ; ce qui témoigne également de la variabilité des crues. De plus, l'année du Dmax le plus élevé ne correspond pas à l'année humide (1971-1972) et l'année du Dmax le plus faible ne correspond pas à l'année sèche (1980-1981). La variabilité interannuelle des Dmax est aussi perceptible avec les valeurs de la puissance de crue d'autant plus que le maximum (0,33) est onze (11) fois plus élevé que le minimum. Aussi, le coefficient de variabilité est relativement élevé. La figure 17 montre que l'évolution interannuelle des Dmax est très fluctuante.



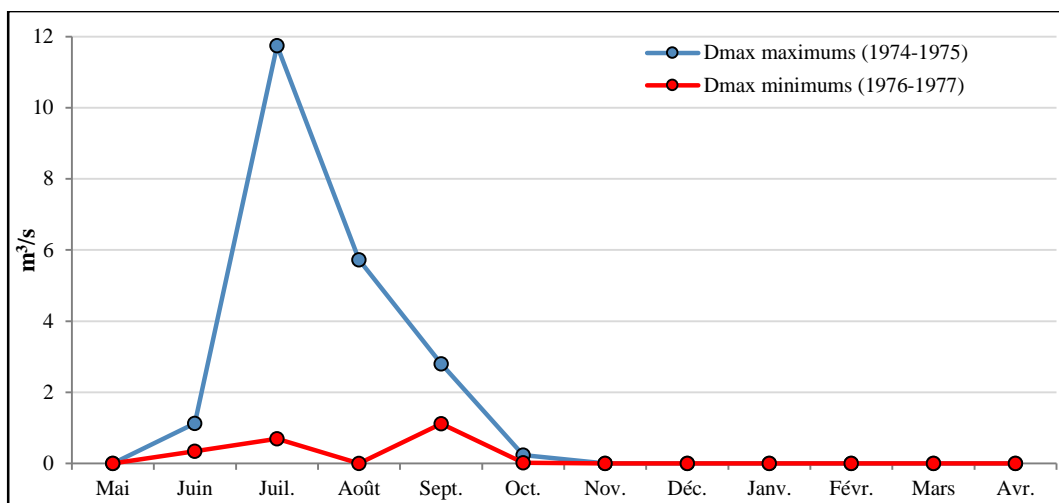
**Figure 17 :** Évolution interannuelle des Dmax à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

L'évolution des Dmax est marquée par des séquences tantôt déficitaires, tantôt excédentaires par rapport à la moyenne de la série. Les années à Dmax déficitaire sont au nombre de 8 soit 53,3% de la série. L'année 1976-1977 est la plus déficitaire avec un fort déficit de l'ordre de 81,5%. Les années à Dmax excédentaire par rapport à la moyenne sérielle représentent 46,7% avec un maximum qui totalise un excédent très élevé de l'ordre de 92,9% noté en 1974-1975. La quantité de pluie reçue et son irrégularité ainsi que le degré de pertes (évaporation) peuvent expliquer cette variabilité des Dmax. D'ailleurs, la rupture notée sur la variabilité interannuelle de la pluviométrie intervient au même moment sur celle des Dmax. En outre, il nous semble nécessaire d'analyser les Dmax suivant les années extrêmes pour vulgariser la forte variabilité de la crue.

### **2.1.3. Les crues des années extrêmes**

Il s'agit de l'analyse combinée de l'année hydrologique qui enregistre les crues maximums et celle qui détient les crues minimums. Ainsi, les Dmax maximums sont répertoriés sur l'année 1974-1975 avec 11,74 m<sup>3</sup>/s ; alors que les Dmax minimums sont notés en 1976-1977 avec 1,12 m<sup>3</sup>/s.

Au cours de l'année des Dmax maximums (1974-1975), l'hydraulicité est relativement importante (139,4%) de même que la pluviométrie annuelle (943 mm) qui présente un excédent de 25,5% par rapport à la moyenne (751,7 mm). Ainsi, l'abondance de la pluviométrie sur cette année est à l'origine de l'importance de l'écoulement journalier et annuel, car la pluie est le seul mode d'alimentation dans le bassin du Niaoulé. De l'autre côté, l'année du Dmax minimum (1976-1977) coïncide avec la phase sèche de la pluviométrie (à partir de 1976). Elle enregistre un écoulement moyen annuel qui affiche un débit de 0,04 m<sup>3</sup>/s soit un déficit de 82,6% par rapport à la moyenne (0,23 m<sup>3</sup>/s) et une faible hydraulicité (16,7%). La pluviométrie révèle également un déficit de l'ordre de 11,4% par rapport à la moyenne de la série (1960-2020). L'ensemble de ces résultats nous permettent d'affirmer que l'année hydrologique 1974-1975 est humide contrairement à celle de 1976-1977 qui est sèche. La figure 18 retrace l'évolution de ces deux années.



**Figure 18 :** Evolution des Dmax en années extrêmes à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986)

## 2.2. Les étiages

Contrairement aux crues, les étiages sont des phénomènes extrêmes de l'écoulement qui interviennent dans la période de basses eaux où la pluviométrie est absente. L'étiage peut être compris comme une phase affectée par plusieurs jours ou mois à écoulement faible (Sow, 2007 ; Faye, 2013) ; une période de décroissance des débits due à l'absence de la pluie (Dacharry, 1996).

Les difficultés liées aux mesures des débits pour les cours d'eau temporaires rendent l'analyse des étiages plus complexe ; ils sont difficilement identifiés à cause des basses eaux prolongées. Toutefois, les étiages peuvent être caractérisés par leur date d'apparition, la valeur du débit minimal et leur durée.

Comme nous l'avons fait pour les crues, nous avons essayé de représenter les fréquences d'apparition du Dmin par décade à la station de Niaoulé Tanou (tableau 23.).

**Tableau 23 :** Fréquences d'apparition des étiages par décade à la station de Niaoulé Tanou (1971 – 1986)

Décades	Du 21 au 31 juillet	Du 11 au 20 août	Du 11 au 20 septembre	Du 21 au 30 septembre	Du 1er au 10 octobre	Du 21 au 31 octobre	Du 1er au 10 novembre	Du 1er au 10 décembre	Total
Fréquence décade (%)	7	6	13	7	27	27	7	6	100
Fréquence par mois (%)	7	6	20		54		7	6	100

Dans le bassin du Niaoulé, l'étiage absolu s'annule ( $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pour chaque année hydrologique. Ainsi, nous convenons avec Sow (2006) que le mois d'octobre enregistre la fréquence d'apparition du Dmin la plus élevée soit 54%. Cette fréquence est partagée entre la première décennie (du 1<sup>er</sup> au 10 octobre) et la dernière décennie (du 21 au 31 octobre) de ce mois avec 27 % des fréquences pour chacune. De plus, l'apparition du Dmin au mois de juillet avec 7 % témoigne en partie de la modicité de l'écoulement d'autant plus que ce dernier débute au mois de mai. Le mois de septembre aussi enregistre une fréquence non négligeable de 20% répartie entre la seconde et la troisième décennie avec respectivement 13% et 7% des fréquences.

Les étiages interviennent normalement au mois d'octobre (54%). La proportion restante est répartie entre les autres mois. Cela témoigne de la variation des dates d'apparition des étiages.

### 2.3. Le tarissement

Le tarissement peut être conçu comme la période d'écoulement d'un cours d'eau marquée par la décroissance régulière du débit sans apport météorologique ni humain (Dacharry, 1997). Il peut être assimilé à la phase de vidange des nappes ; ce qui induit une diminution de la capacité de soutien du cours d'eau en période non pluvieuse. Le tarissement suit la phase de décrues et se caractérise par la loi développée par M. Roche, (1963) sous la forme d'une loi exponentielle :

$$Q = Q_0 e^{-kt}$$

avec  $Q$  : le débit à la fin du tarissement ;  $Q_0$  : le débit au jour où débute le tarissement ;  $t$  : le nombre de jours entre  $Q_0$  et  $Q$  ;  $k$  : le coefficient de tarissement.

D'après Faye (2013), le caractère exponentiel de cette loi de tarissement obéit au principe selon lequel les réserves d'eau souterraine s'assèchent progressivement lorsque toutes les nappes ont des puissances semblables au début du tarissement. À partir de cette loi, nous pouvons déduire la valeur du coefficient de tarissement ( $k$ ) par la transformation de l'équation sous la forme suivante :

$$k = \frac{\log Q - \log Q_0}{t}$$

En outre, le coefficient de tarissement peut également donner une idée sur les dimensions géométriques et la perméabilité d'une nappe avec l'application de la loi de Darcy d'où :

$$k = \frac{MPS}{AI}$$

Dans cette loi, **k** est le coefficient de tarissement, **M** la perméabilité, **P** la porosité du matériau aquifère, **s** la section d'échange entre la nappe et la rivière, **I** la largeur de la nappe et **S** la superficie du bassin versant.

La variation constatée au niveau des crues et des étiages ne fait pas exception pour le tarissement. Les dates de début et de fin du tarissement connaissent une situation instable (tableau 24).

**Tableau 24 :** Fréquences des dates de début et de fin du tarissement à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986)

Dates de début du tarissement							
Décades	du 1er au 10 sept.	du 11 au 20 sept.	du 21 au 30 sept.	du 1er au 10 oct.	du 11 au 20 oct.		AN
Effectifs	5	3	2	3	2		15
Fréquences	33,3	20	13,3	20	13,3		100
Fréquences mensuelles	66,7			33,3			100
Dates de fin du tarissement							
Décades	du 12 au 21 mai	du 22 au 31 mai	du 1er au 10 juin	du 11 au 20 juin	du 21 au 30 juin	du 1er au 10 juillet	AN
Effectifs	1	1	5	6	1	1	15
Fréquences	6,7	6,7	33,3	40	6,7	6,7	100
Fréquences mensuelles	13,3		80			7	100

Dans le bassin du Niaoulé, les débuts du tarissement sont étalés sur 5 décades soit 3 pour le mois de septembre et 2 pour le mois d'octobre. La fréquence maximale d'apparition du tarissement (33,3%) est enregistrée à la première décade du mois de septembre. La deuxième et troisième décade du mois de septembre englobent respectivement 20% et 13,3% de la fréquence totale d'apparition du tarissement ; ce qui fait un total de 66,7% pour le mois de septembre soit 10 apparitions sur 15. Le mois d'octobre englobe 33,3 % de cette fréquence répartie entre la première et la deuxième décade avec respectivement 20% et 13,3%.

Contrairement aux débuts, les fins du tarissement sont réparties entre 6 décades dont 2 pour le mois de mai, 3 pour le mois de juillet et 1 pour le mois de juillet. Ici, nous constatons que le tarissement finit le plus souvent au mois de juin qui enregistre 80% des fréquences réparties sur ses 3 décades avec respectivement 33,3%, 40% et 6,7%. Le mois de mai enregistre 13,3% de la fréquence totale des fins du tarissement. Cette fréquence est répartie entre la deuxième et la troisième décade avec 6,7% pour chaque décade. Le mois de juillet quant à elle n'enregistre que 7% à sa première décade.

L'analyse du tableau 24 montre que dans le bassin du Niaoulé, le tarissement intervient normalement au mois de septembre (66,7%) et se termine le plus souvent au mois de juin (80%). Toutefois, l'intervention des débuts et fins de tarissement dans les autres mois témoigne de la variabilité de ce phénomène extrême de l'écoulement d'un cours d'eau.

### **Conclusion partielle**

Le bassin du Niaoulé est caractérisé par un écoulement saisonnier qui est très variable. Cette variabilité est perçue à l'échelle journalière, mensuelle et annuelle. La variabilité du régime est corrélée à celle des paramètres climatiques qui déterminent les modalités de l'écoulement fluvial en zone tropicale. D'ailleurs, l'écoulement s'étale sur 8 mois (de mai à décembre) et est en adéquation avec la saison pluvieuse qui commence en mai et s'achève en octobre. De plus, les années d'avant 1975 ont un module moyen annuel beaucoup plus important que les années post 1975. L'analyse des CMD a montré que le régime fluvial du Niaoulé est de type tropical de transition. Ce régime est caractérisé par quatre (04) mois de hautes eaux (de juin à septembre) et huit (08) mois de basses eaux (de d'octobre à mai). L'alimentation en eau du bassin est exclusivement pluviale. Les phénomènes extrêmes sont également variables avec des crues très médiocres et des étiages sévères. Les crues sont très variables en valeurs et en période d'apparitions. Toutefois, elles interviennent le plus souvent au mois de juillet. De même, les étiages surviennent fréquemment au mois d'octobre. Cependant, ils sont enregistrés sur des décades différentes et l'évolution de leurs valeurs est irrégulière. Cette variabilité notée au niveau des crues et des étiages ne fait pas exception pour le tarissement qui revêt un caractère précoce. Il débute en septembre et s'achève en juin dans la majorité des cas.

L'analyse des régimes et des phénomènes extrêmes donne une idée sur l'abondance et des disponibilités en eau du bassin du Niaoulé que nous avons essayé de déterminer dans le chapitre suivant.

## Chapitre 4 : Bilan hydrologique et disponibilités en eau dans le bassin du Niaoulé

---

Les disponibilités en eau dans un espace et sur un temps donné peuvent être déterminées à travers l'analyse du bilan hydrologique. Le bilan hydrologique met en évidence le budget existant entre les entrées (lame d'eau précipitée dans le bassin) et les sorties (lame d'eau écoulée, évaporée ou stockée) en eau dans un espace et un temps donné. Les termes du bilan hydrologique sont la lame d'eau précipitée en mm ( $P_{(mm)}$ ), la lame d'eau écoulée en mm ( $Q_{(mm)}$ ), la lame d'eau évaporée en mm ( $E_{(mm)}$ ) et la lame d'eau mise en réserve dans les nappes ou les sols ( $-\Delta R_{(mm)}$ ) puis restituée par ses mêmes réserves en un moment ( $+\Delta R_{(mm)}$ ). Le bilan hydrologique est donc transcrit par la formule suivante :

$$P_{(mm)} = Q_{(mm)} + E_{(mm)} \pm \Delta R_{(mm)}$$

La lame d'eau écoulée ( $Q_{(mm)}$ ) s'obtient par la formule suivante :

$$Q_{(mm)} = \frac{Q_{(m^3s^{-1})} \times t_{(s)}}{S_{(km^2)} \cdot 10^3}$$

Avec  $Q$  ( $m^3/s$ ) : le débit moyen ;  $t$  (s) : égal au nombre de secondes dans l'année ;  $S$  ( $km^2$ ) : surface du bassin.

En outre, ces différents termes de l'équation du bilan nous permettent de calculer le volume écoulé ou indice d'écoulement ( $V_{(m^3/an)}$ ), le coefficient d'écoulement ( $CE_{(%)}$ ) et le déficit d'écoulement ( $DE_{(mm)}$ ) encore appelés la lame d'eau perdue ou prélevée par évaporation avec les formules suivantes :

$$V_{(m^3/an)} = Q_{(m^3/s)} \times t_{(s)} ; CE_{( \% )} = \frac{Q_{(mm)}}{P_{(mm)}} \times 100 ; DE_{(mm)} = P_{(mm)} - Q_{(mm)}$$

Dans le cadre de cette étude, les disponibilités en eau dans le bassin du Niaoulé sont analysées en année moyenne et en années extrêmes.

## I. Le bilan moyen de l'écoulement

Le bilan moyen est analysé avec les données climatiques de la station de Tambacounda et les données hydrométriques de la station de Niaoulé Tanou entre 1971 et 1986 (tableau 25). La pluviométrie moyenne reçue dans le bassin pour cette période varie entre 500 et 1000 mm ; ce qui correspond au domaine climatique dite nord-soudanien.

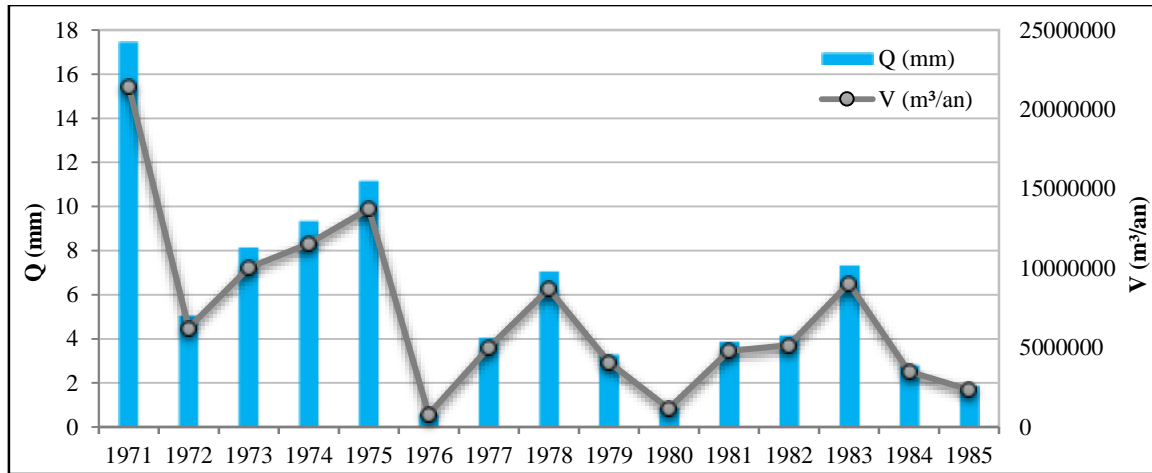
**Tableau 25 :** Caractéristiques du bilan moyen annuel dans le bassin du Niaoulé entre 1971 et 1986

Paramètres	Q (m <sup>3</sup> /s)	P (mm)	Q (mm)	DE (mm)	V (m <sup>3</sup> /an)	CE (%)
<b>Moyenne</b>	3,4	685,5	5,8	679,7	7 175 328,7	0,8
<b>Écart-type</b>	0,2	161,5	4,4	158,3	5 467 883,1	0,5
<b>CV</b>	0,1	0,2	0,8	0,2	0,8	0,6
<b>Maximum</b>	0,7	988,2	17,4	970,8	21 458 671,2	1,8
<b>Minimum</b>	0,0	458,0	0,7	453,8	807 161,8	0,1
<b>Écart</b>	0,7	530,2	16,8	516,9	20 651 509,4	1,7

Au regard du tableau 25, nous constatons que malgré l'importance de la pluviométrie (685,5 mm), la lame d'eau écoulee est moindre (5,8 mm). Cette situation peut s'expliquer par la faiblesse des pentes du bassin et la présence du couvert végétal qui ralentissent l'écoulement. Cette lenteur favorise aussi des pertes d'eau surtout par évaporation. D'ailleurs, l'importance de la valeur du déficit d'écoulement (679,7 mm) justifie cette thèse d'autant plus qu'il correspond majoritairement à l'évapotranspiration potentielle (ETP). Rappelons que dans cette zone les températures sont relativement élevées et les formations végétales ouvertes autorisent un rayonnement direct sur les plans d'eau. Ainsi, entre 1971 et 1986, le bassin n'a écoulé que 0,85% de lame d'eau moyenne reçue soit un volume annuel de 7 175 329 m<sup>3</sup>/an.

Globalement les valeurs caractérisant le bilan moyen sont faibles à cause de la péjoration des conditions climatiques observées durant la période allant de 1970 à la fin des années 90. En d'autres termes, la sécheresse a engendré des conséquences désastreuses sur les ressources en eau du bassin du Niaoulé qui se traduisent par la faible valeur des débits écoulés et leur variation. Cette variation est ainsi valable pour les disponibilités annuelles d'eau qui peuvent être appréhendées à travers l'analyse de la lame et le volume d'eau écoulee (figure 19).





**Figure 19 :** Évolution annuelle de la lame et du volume d'eau écoulée dans le bassin du Niaoulé (1971-1986)

À la station de Niaoulé Tanou, la lame d'eau moyenne écoulée sur la période de 1971 à 1986 est de 5,8 mm avec un coefficient de variation égale à 0,8. L'écart entre le maximum et le minimum est de 16,8 mm soit 96,5 %. Sur la série étudiée (1971-1986), 9 années hydrologiques ont écoulé une lame d'eau inférieure à la moyenne sérielle sur un total de 15 (soit 60%).

Les volumes annuels écoulés suivent la même évolution que celle des lames d'eau écoulées. Ils sont donc très variables avec un maximum de 21 458 671 m³/an et un minimum égal à 807 162 m³/an soit un écart de l'ordre de 96%. Ainsi, à la station de Niaoulé Tanou, 40% des années hydrologiques de la série (1971-1986) enregistrent un volume annuel supérieur à la moyenne qui est de 7 175 329 m³/an.

Au regard de ces deux paramètres, nous pouvons constater que les disponibilités en eau du Niaoulé sont marquées par une grande variabilité. Cette variation est corrélée à celle de la pluviométrie d'autant plus que les années qui précèdent la rupture (après 1975) enregistrent un volume et une lame d'eau plus importante que celle d'après rupture. La variabilité du bilan est plus perceptible à travers l'analyse des années extrêmes.

## II. Le bilan hydrologique en années extrêmes

L'année hydrologique 1971-1972 constitue l'année la plus humide de la série (1971-1986) avec un débit moyen annuel de 0,68 m³/s ; alors que l'année 1980-1981 est la plus sèche avec un module moyen annuel de 0,04 m³/s soit un écart de 0,64 m³/s. Ainsi, l'analyse de ces deux années extrêmes permet de déceler davantage la variation du bilan hydrologique dans la mesure

où les écarts entre les paramètres sont très remarquables. Le tableau 26 montre les caractéristiques du bilan hydrologique aux années extrêmes.

**Tableau 26 :** Caractéristiques du bilan hydrologiques en années extrêmes à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986)

Paramètres	1971 - 1972 (année du module annuel le plus élevé)	1980 - 1981 (année du module annuel le plus faible)	Écarts
Q (m <sup>3</sup> /s)	0,68	0,04	0,64
P (mm)	988,2	523,1	465,1
Q (mm)	17,45	0,94	16,51
DE (mm)	970,75	522,16	448,59
V (m <sup>3</sup> /an)	21 458 671,2	1 161 596,16	20 297 075
CE (%)	1,8	0,18	1,62

### 2.1. Le bilan en année du débit moyen le plus élevé

L'année 1971-1972 enregistre une pluviométrie moyenne annuelle égale à 988,2 mm ; alors que la lame d'eau écoulée est de 17,45 mm d'où un coefficient d'écoulement égal à 1,8 %. Le déficit d'écoulement est ainsi très élevé avec 970,8 mm soit 98% de la lame d'eau reçue. Le volume annuel est estimé à 21 458 671,2 m<sup>3</sup> soit 2,9 fois supérieure au volume moyen de la série (tableau 26). Au regard de tous ces chiffres, nous constatons que malgré une pluviométrie importante, l'écoulement est faible et les pertes d'eau sont élevées alors qu'il s'agit de l'année du débit moyen le plus élevé de la série. Cela témoigne de la faiblesse des valeurs de l'écoulement à cause de la sécheresse durant cette période. Toutefois, entre les deux années extrêmes, il existe un grand écart en termes de valeur.

### 2.2. Le bilan en année du débit moyen le moins élevé

L'année du débit moyen le plus faible (1980-1981) enregistre une pluviométrie égale à 523,1 mm soit un écart de 465,1 mm comparé à l'année du débit moyen le plus élevé. La lame d'eau écoulée pour cette année est de 0,84 mm, ce qui est encore plus faible. L'écart de la lame d'eau calculé entre les deux années extrêmes est de 16,51 mm soit 94,6%. Le volume annuel écoulé en 1980-1981 est de 1 161 596,16 m<sup>3</sup> soit 6 fois plus faibles que le volume moyen de la série. L'écart entre les volumes des deux années extrêmes est de 20 297 075 m<sup>3</sup>. Le coefficient d'écoulement est donc faible à cause de l'importance des pertes qui représentent 99,8% (tableau 26). Les écarts entre les coefficients et les déficits d'écoulement sont également élevés. Cette grande différence entre les années hydrologiques montre la variabilité de l'écoulement.

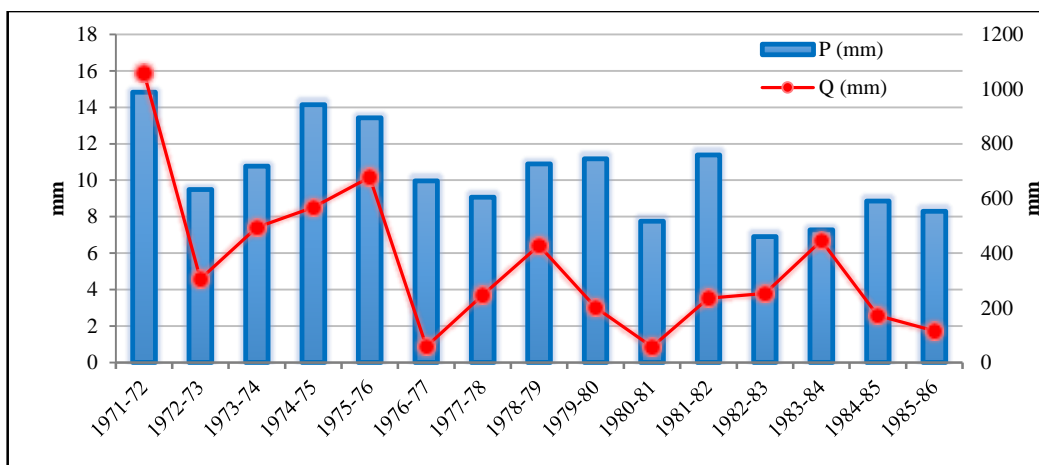
En résumé, il apparaît clairement que l'analyse des disponibilités en eau dans le bassin du Niaoulé révèle un déficit d'écoulement supérieur à 98% et une forte variabilité des principales caractéristiques du cours d'eau. De plus, nous constatons que la sécheresse a engendré une diminution des valeurs des débits écoulés dans le bassin du Niaoulé. Ainsi, il devient important de déterminer la tendance générale de la dynamique hydrologique.

### III. Estimation du comportement hydrologique du bassin du Niaoulé

À cette étape de notre analyse, il est nécessaire d'éclairer le caractère de la dynamique des ressources en eau de notre bassin sur une période plus longue. En effet, les données hydrologiques ne couvrent qu'une courte période (de 1971 à 1986) ; alors que celles climatiques s'étendent sur une période largement plus longue (de 1951 à 2021). Ainsi, il serait plus judicieux de faire une estimation du comportement hydrologique en se basant sur la pluviométrie et l'évapotranspiration. Ces deux éléments sont essentiels à la détermination des disponibilités en eau dans un bassin d'autant plus qu'ils constituent les termes indispensables du bilan hydrologique.

#### 3.1. Analyse des tendances de la dynamique hydrologique dans le bassin du Niaoulé

Pour analyser les tendances de la dynamique hydrologique dans le bassin du Niaoulé, nous nous baserons sur l'hypothèse selon laquelle l'écoulement du Niaoulé est tributaire à la pluviométrie. En d'autres termes, plus la lame d'eau précipitée est élevée, plus la lame d'eau écoulée serait importante, et vice-versa. La figure 20 retrace l'évolution des deux paramètres précités.



**Figure 20 :** Évolution de la lame d'eau précipitée (Pmm) et celle écoulée (Qmm) dans le bassin du Niaoulé (1971-1986)

La figure 20 montre une corrélation presque parfaite de l'évolution des deux paramètres représentés. Ainsi, sur les 15 années hydrologiques analysées, seulement 5 (1975-1976, 1977-1978, 1979-1980, 1982-1983 et 1984-1985) ne respectent pas la règle soit un pourcentage de 33,3%. Ces dernières sont répertoriées dans la phase sèche de la pluviométrie. Cette situation peut s'expliquer par l'irrégularité de la pluie constatée surtout pendant la période sèche qui enregistre des coefficients de variation élevés. En effet, plusieurs études ont révélé que la distribution des précipitations au cours de l'année influe sur l'évolution caractéristique de l'écoulement (Rodier, 1963 ; Frécaut et Pagné, 1983 ; Faye et *al.*, 2015). D'ailleurs, les années qui présentent une corrélation assez faible sont affectées par une importante irrégularité intra-annuelle de l'évolution de la pluviométrie avec des coefficients de variation compris entre 1,3 et 1,1 (données pluviométriques de l'ANACIM). De l'autre côté, la majorité des années hydrologiques (66,7%) décrivent une évolution assez synchrone de l'écoulement par rapport à la lame d'eau précipitée. De plus, nous constatons une baisse des deux paramètres à partir de l'année de rupture pluviométrique (1975). Ce qui nous amène d'ailleurs à analyser les tendances par le test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) avec un taux de significativité de 95% (tableau 27).

**Tableau 27** : Résultats du test de tendance de Mann-Kendall appliqué au bassin du Niaoulé (1971-1986)

Paramètres	Tau de Kendall	p-value	Tendance	Caractère
<b>P (mm)</b>	-0,448	0,021	Baisse	Significative
<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	-0,390	0,046	Baisse	Significative

Les résultats du tableau 27 indiquent la tendance à une baisse significative aussi bien pour les précipitations que pour les débits écoulés. Dès lors, nous pouvons constater l'incidence de la sécheresse sur l'hydrologie du Niaoulé. Ainsi, il nous semble nécessaire de caractériser la sécheresse dans le bassin du Niaoulé afin d'observer les conditions de mouillage ou d'assèchement du bassin sur une période plus longue.

### 3.2. Caractérisation de la sécheresse dans le bassin avec le SPEI de 1950 à 2019

Dans cette étude, le SPEI a été utilisé pour surveiller et quantifier la sécheresse dans le bassin du Niaoulé. Les données du SPEI ont été recueillies dans la plateforme du moniteur mondial de la sécheresse : <http://spei.csic.es/index.html>. L'avantage de ce moniteur repose sur le fait qu'il offre des informations en temps relativement réel sur les conditions de sécheresse sur une

zone donnée avec une résolution spatiale de 0,5 degré et une résolution temporelle mensuelle. Le choix du SPEI par rapport à d'autres indices de sécheresse multiscalaires tels que l'indice standardisé de précipitation (SPI) se justifie par le fait qu'il considère le rôle de la température à travers son influence sur l'évapotranspiration potentielle (Beguería et al., 2010). Le SPEI pourrait mieux surveiller l'humidité du sol que le SPI au cours des mois avec une augmentation significative de la température. De plus, il est particulièrement adapté à l'analyse de l'effet du réchauffement climatique sur les conditions de sécheresse (Beguería et al., 2014).

Actuellement, le moniteur mondial de la sécheresse SPEI est basé sur l'équation de Thornthwaite (1948) pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Le calcul du SPEI dans cette étude suit la méthode mentionnée dans l'étude de Vicente-Serrano et al. (2010). Cette dernière repose sur un bilan hydrique climatique qui est déterminé par la différence entre Précipitations (P) et évapotranspiration potentielle (ETP) pour le mois i :

$$D_i = P_i - ETP_i$$

$D_i$  fournit une mesure simple de l'excédent ou du déficit en eau pour le mois analysé.

Les valeurs calculées  $D_i$  sont agrégées à différentes échelles de temps, en suivant la même procédure que celle pour le SPI. La différence,  $D_{i,j}^k$  dans un mois donné j et l'année i dépend de l'échelle de temps choisie (k). Par exemple, la différence accumulée pendant un mois d'une année donnée, avec une échelle de temps de 12 mois, est calculée selon la formule suivante :

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-l,j} + \sum_{l=1}^j D_{i,l,j}, \quad \text{si } j < k, \text{ et}$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+j}^j D_{i,l,j}, \quad \text{si } j \geq k$$

Où  $D_{i,j}$  est la différence de P-ETP du 12<sup>ème</sup> mois de l'année i, en mm.

Et ensuite, la distribution log-logistique est sélectionnée pour normaliser la série D afin d'obtenir le SPEI. La fonction de densité de probabilité de la variable distribuée log-logistique est exprimée comme suit :

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2}$$

Où  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont respectivement les paramètres d'échelle, de forme et d'origine pour les valeurs D comprises dans la plage ( $\gamma > D < \infty$ ).

Ainsi, la fonction de distribution de probabilité de la série D est donnée par :

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}$$

Avec  $F(x)$ , le SPEI peut facilement être obtenu en tant que valeurs normalisées de  $F(x)$ . Par exemple, après l'approximation classique d'Abramowitz et Stegun (1965) :

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}$$

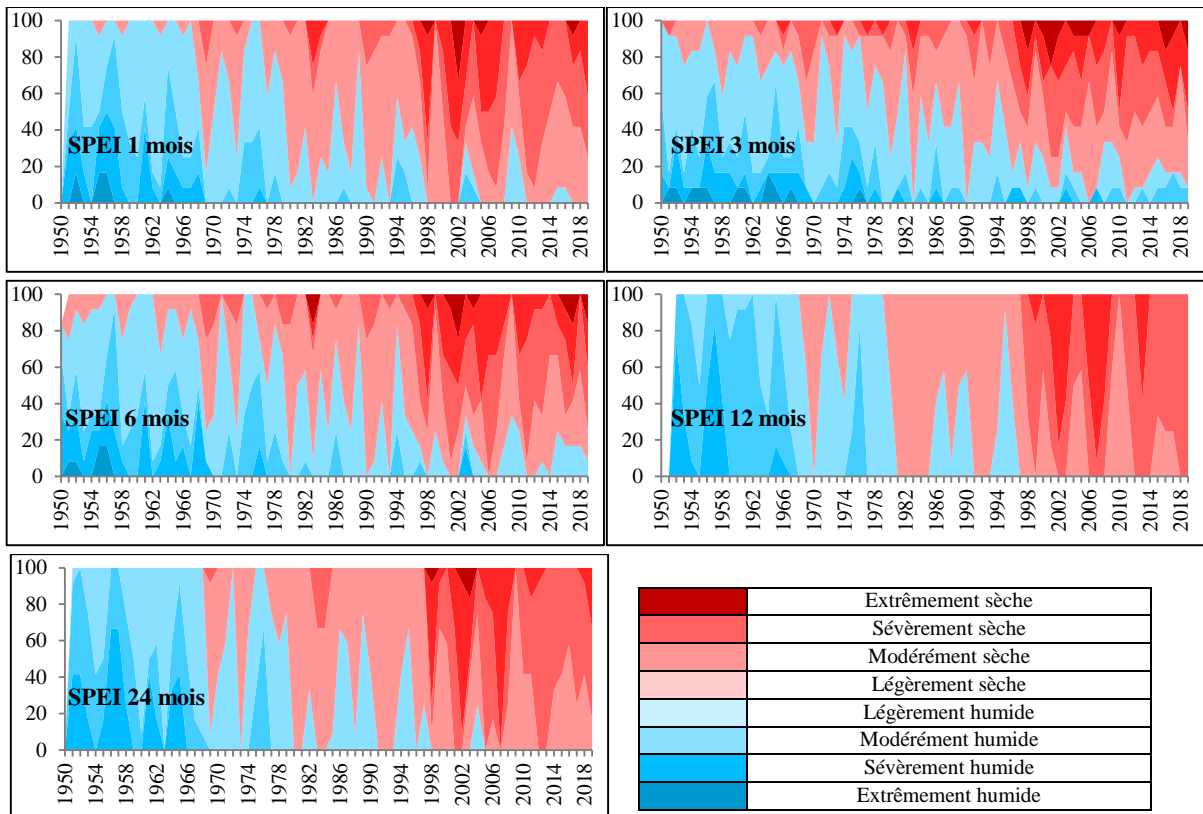
Où  $W = \sqrt{-2 \ln(p)}$  pour  $p \leq 0,5$  et  $p$  est la probabilité de dépasser une valeur  $D$  déterminée,  $p = 1 - F(x)$ . Si  $p > 0,5$ ,  $p$  est remplacé par  $1 - p$  et le signe du SPEI résultant est inversé. Les constantes sont:  $C_0 = 2,515517$ ,  $C_1 = 0,802853$ ,  $C_2 = 0,010328$ ,  $d_1 = 1,432788$ ,  $d_2 = 0,189269$  et  $d_3 = 0,001308$ .

Les valeurs positives de SPEI indiquent les conditions d'humidité supérieures à la moyenne, tandis que les valeurs négatives indiquent les conditions de sécheresse. Un événement de sécheresse est défini lorsque la valeur de SPEI est inférieure ou égale à -1 au cours d'une certaine période. Cela autorise une caractérisation des conditions sèche ou humide en fonction des valeurs de SPEI (tableau 28).

**Tableau 28 :** Catégorisation du degré de sécheresse / d'humidité en fonction des SPEI

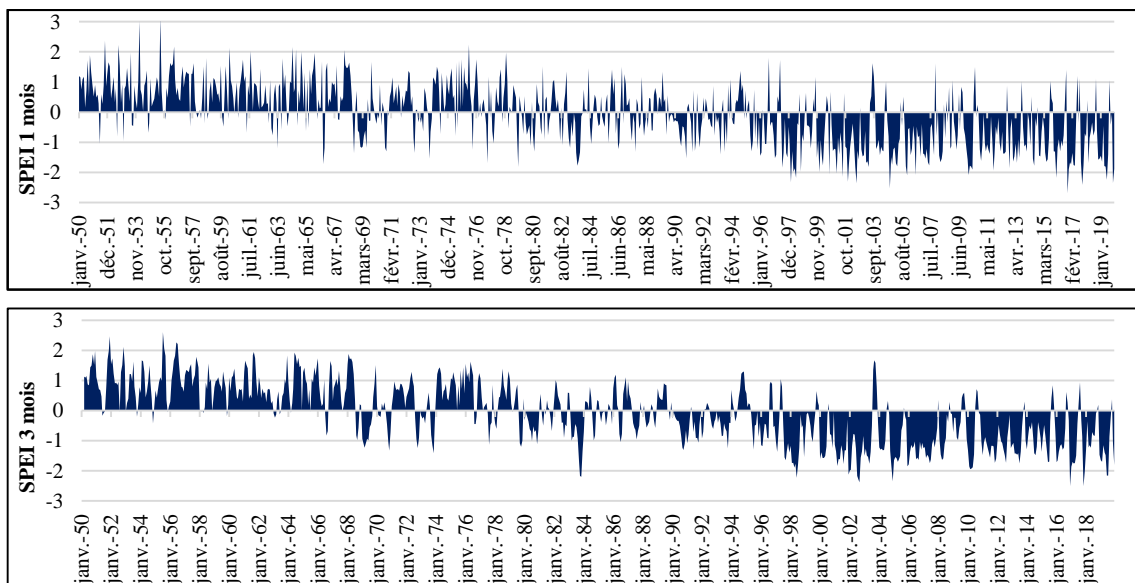
Valeurs SPEI	Séquences de sécheresses	Valeurs SPEI	Séquences humides
SPEI < -2,00	Extrêmement sèche	2,00 < SPEI	Extrêmement humide
-1,50 < SPEI < -1,99	Sévèrement sèche	1,50 < SPEI < 1,99	Sévèrement humide
-1,00 < SPEI < -1,49	Modérément sèche	1,00 < SPEI < 1,49	Modérément humide
0,00 < SPEI < -0,99	Légèrement sèche	0,00 < SPEI < 0,99	Légèrement humide

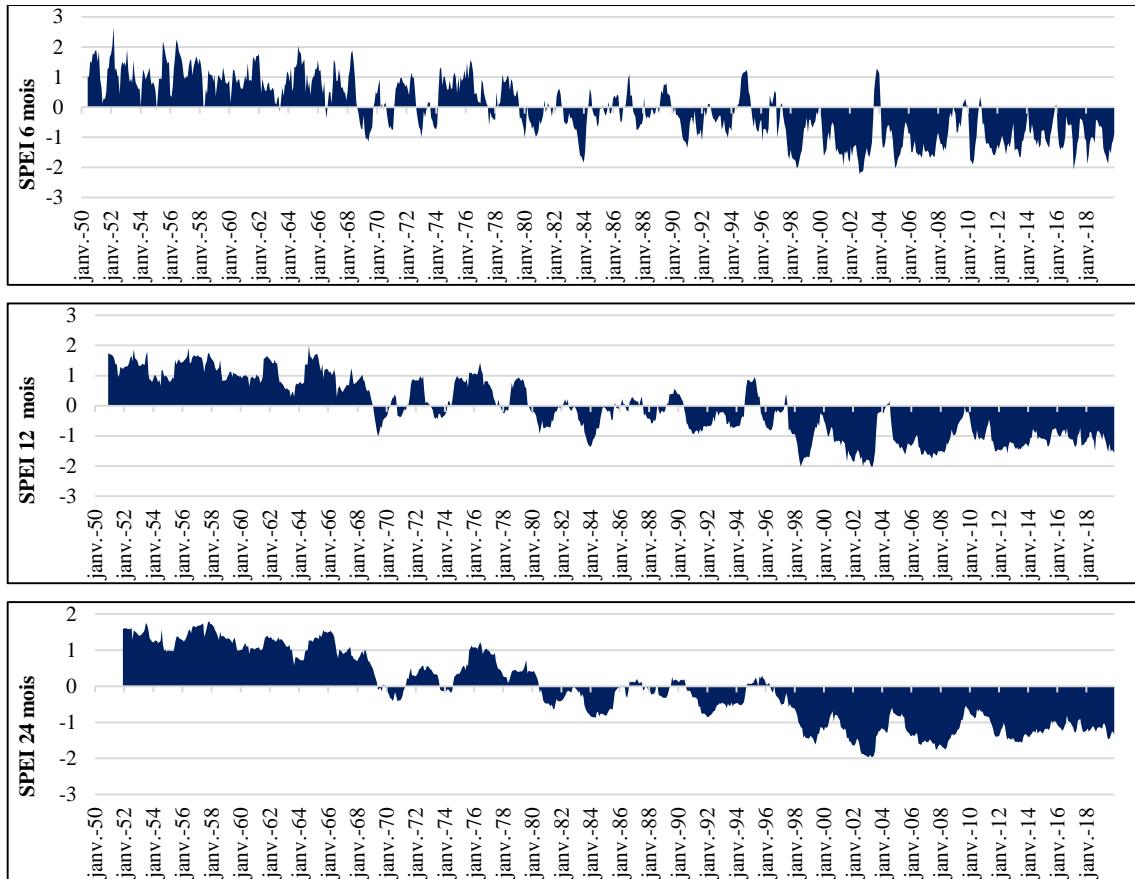
Les données de SPEI téléchargées sur le moniteur s'étendent de 1950 à 2019. Le traitement de ces données nous a permis d'abord, de définir des modèles multi-échelles. Ensuite, nous avons détecté la tendance au dessèchement ou au mouillage du bassin avec l'application du test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945 ; Kendall, 1975).



**Figure 21 :** Évolution fréquentielle des catégories de sécheresse avec le SPEI dans le bassin du Niaoulé (1950-2019)

Le SPEI mensuel a été calculé de 1950 à 2019 à 5 échelles de temps (1, 3, 6, 12 et 24 mois) pour la totalité du bassin du Niaoulé subdivisé en une centaine de pixels distants de 0,5°. Ces séries de SPEI de ces pixels ont été moyennées afin de caractériser les conditions sèches ou humides du bassin (figure 21).





**Figure 22 :** Evolution temporelle des valeurs de SPEI dans le bassin du Niaoulé (1950-2019)

Les figures 21 et 22 affichent clairement une tendance à la hausse des séquences de sécheresse et une baisse des séquences humides au fil des années. Les séries de SPEI analysées sur les échelles de temps susmentionnées révèlent toutes une tendance au dessèchement du bassin. Ce dessèchement est beaucoup plus apparent au niveau des échelles de temps 12 et 24 mois surtout sur la période 1990-2019. Le bassin du Niaoulé était principalement marqué par des conditions d'humidité légère à sévère et rarement extrême avant les années 1970 (comme noté sur les échelles de temps 1, 3 et 6 mois). Les sécheresses ont débuté à partir des années 1970 et sont généralement de nature légère à modérée, même si des cas de sécheresses sévères à extrêmes apparaissent sur certains mois sur les différentes échelles de temps. La tendance au dessèchement est également confirmée par le test de Mann-Kendall qui indique une baisse significative des valeurs de SPEI sur les 5 échelles de temps à un niveau de confiance de 95% (tableau 29).



**Tableau 29** : Tendance des séries de SPEI dans le bassin du Niaoulé (1950 - 2019)

Échelles de temps	Tau de Kendall	p-value	Tendance	Caractère
SPEI 1 mois	-0,41	< 0,0001	Baisse	Significative
SPEI 3 mois	-0,50	< 0,0001	Baisse	Significative
SPEI 6 mois	-0,57	< 0,0001	Baisse	Significative
SPEI 12 mois	-0,64	< 0,0001	Baisse	Significative
SPEI 24 mois	-0,71	< 0,0001	Baisse	Significative

Le regroupement des valeurs de SPEI par décennie pour chaque échelle de temps permet de constater que les périodes 1950-1959, 1960-1969 et 1970-1979 ont un caractère humide ; tandis que celles de 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 et 2010-2019 sont plutôt sèches (tableau 30). Ces résultats confirment les travaux de certains auteurs qui ont déjà eu à signaler une grave sécheresse en Afrique occidentale (Servat *et al.*, 1999 ; Sighomnou, 2004 ; Goula *et al.*, 2005 ; Soro *et al.*, 2014) et au Sénégal (Ndong, 1996 ; Sané 2003 ; Faye *et al.*, 2015 ; Faye *et al.*, 2017 ; Faye, 2017, 2018b) en indiquant que les décennies 1970, 1980 et 1990 ont été des périodes sèches frappées par un fort déficit pluviométrique. Ainsi, la décennie 1950-1959 demeure la plus humide et celle de 2000-2009 reste la plus sèche. Cela veut dire que la dernière décennie (2010-2019) bien qu'étant sèche, l'est moins que la précédente. Dès lors, nous notons une légère augmentation des conditions de mouillage du bassin dû à l'amélioration des conditions pluviométriques comme le constatent certains auteurs (Ali et Lebel., 2009 ; Ozer *et al.*, 2009 ; Ouoba, 2013). Cela est étayé par une analyse des SPEI en fonction des décennies (tableau 30).

**Tableau 30** : Valeurs moyennes des SPEI réparties en décennies de 1950 à 2019 sur le bassin du Niaoulé

Décennies	SPEI 1	SPEI 3	SPEI 6	SPEI 12	SPEI 24
1950-1959	0,76	0,93	1,12	1,29	1,39
1960-1969	0,51	0,65	0,71	0,83	0,99
1970-1979	0,33	0,34	0,37	0,38	0,37
1980-1989	-0,05	-0,12	-0,20	-0,26	-0,26
1990-1999	-0,38	-0,44	-0,49	-0,51	-0,49
2000-2009	-0,84	-0,99	-1,07	-1,18	-1,31
2010-2019	-0,81	-0,98	-1,03	-1,12	-1,17

Rappelons que l'analyse de la pluviométrie a fait montre d'un retour de séquences humides à partir de 2003 même si l'optimum des années d'avant 1975 n'est pas encore atteint. En revanche, l'évolution temporelle des valeurs de SPEI n'affiche pas la même évolution (figure 22). Cette situation est probablement liée à l'augmentation de température signalée, avec le changement climatique (IPCC, 2013). D'après Xing et *al.*, (2015), la hausse de la température a amélioré l'ETP, ce qui a accru le déficit en eau et a ainsi abaissé la valeur de SPEI. Ce réchauffement climatique conduirait probablement à l'intensification du cycle hydrologique (Yeh et Wu, 2018), entraînant des changements dans la disponibilité des ressources en eau. D'ailleurs, certains auteurs pensent que la baisse des précipitations est corolaire à une chute de l'écoulement moyen (Anderson et *al.*, 2005) qui est deux fois plus important que le taux de perte des précipitations (Decroix et *al.*, 2009). Le bassin du Niaoulé continue alors à subir les effets de la sécheresse qui laisse entrevoir une diminution des ressources en eau de surface et souterraine.

### **Conclusion partielle**

L'analyse du bilan hydrologique révèle, dans sa globalité, que malgré une pluviométrie moyenne relativement abondante, la lame d'eau écoulée est faible. Le déficit d'écoulement est donc élevé à cause de la faiblesse des pentes et la forte évaporation. Entre 1971 et 1986, le Niaoulé n'a écoulé que 7 175 328,7 m<sup>3</sup>/an en moyenne, ce qui est très faible. Aussi, la tendance générale de l'évolution des volumes d'eau écoulée est à la baisse de même que la lame d'eau écoulée. Le bilan hydrologique est également très variable entre les années hydrologiques. Cette variation est plus étayée par l'analyse des années extrêmes où les volumes sont beaucoup plus importants en année du débit moyen le plus élevé. De plus, les disponibilités en eau sont plus importantes sur la période d'avant 1975 que sur la période d'après. Encore, les déficits d'écoulement sont très sévères (supérieurs à 90 %).

L'analyse des SPEI a permis de compenser l'indisponibilité des données hydrométriques sur une longue période afin de constater les conditions de mouillage ou de dessèchement du bassin. Ainsi, les résultats ont révélé que malgré le retour de la pluviométrie observé sur les dernières années, le bassin du Niaoulé continue à subir les impacts de la sécheresse des années 1970. Cette dernière a intensifié la baisse des ressources en eau de surface et par extension celles souterraines du bassin. La baisse des ressources en eau du bassin, occasionnant des effets sur les activités socio-économiques, est d'ailleurs confirmée par la perception populaire.

# **TROISIEME PARTIE : USAGES DE L'EAU ET IMPACTS DE LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES EN EAU SUR LES ACTIVITES SOCIO- ECONOMIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU NIAOULE**

---

Dans cette partie nous analyserons d'abord les activités économiques qui se développent dans le bassin du Niaoulé. Ensuite, nous montrerons le poids de chaque usage des eaux de surface ainsi que celles souterraines. Enfin, nous déterminerons les effets de la diminution de l'évolution des ressources sur les principales activités socio-économiques avant de souligner les stratégies d'adaptation mises en œuvre par les populations et leurs limites.

## **Chapitre 5 : Les ressources en eau et leurs usages dans le bassin du Niaoulé**

---

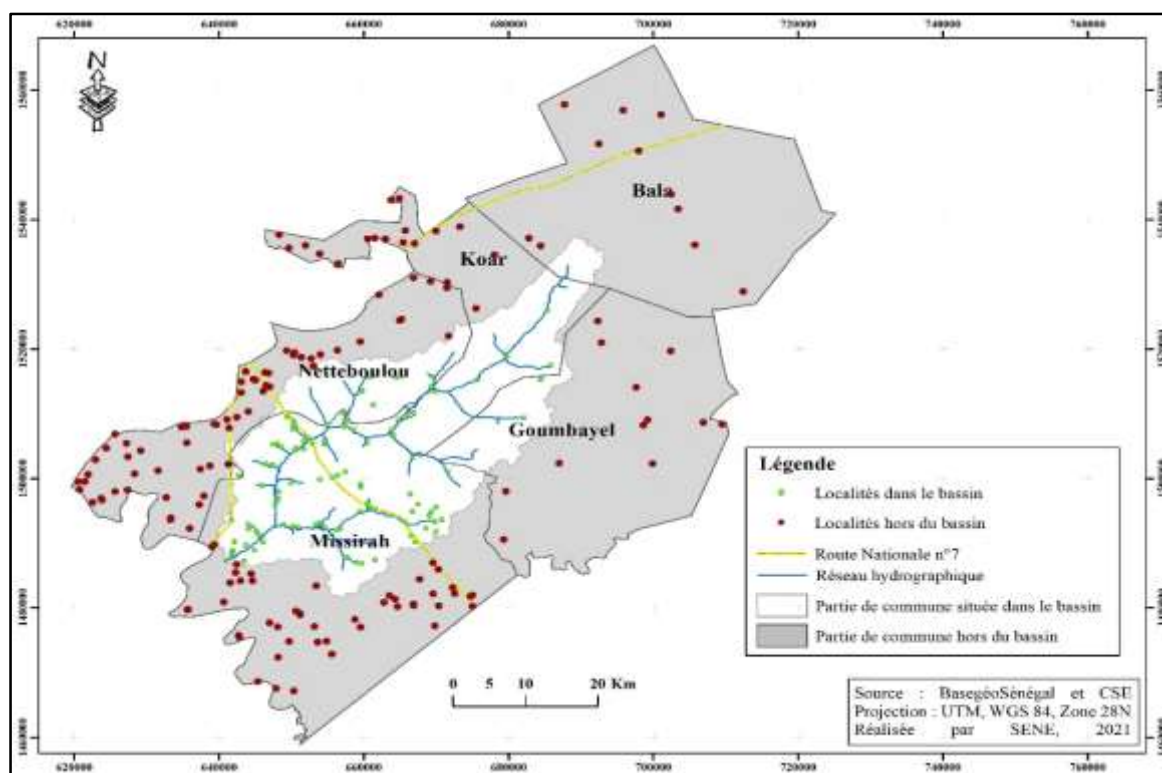
Le bassin du Niaoulé est doté d'importantes potentialités hydriques qui s'entrevoyent à travers les eaux de surface et celles souterraines alimentées par une pluviométrie relativement importante (entre 500 mm et 1000 mm). Cette situation donne lieu à une variété d'usages inhérents à l'occupation du sol, la croissance des activités économiques, l'augmentation de la population et sa distribution spatio-temporelle. L'usage de l'eau peut être compris comme l'action de mettre en application les fonctions de l'eau pour atteindre un but (Margat et Cottez, 1995). En outre, l'importance des utilisations varie en fonction de la quantité et de la qualité de la ressource. Pour mieux comprendre les usages, il est nécessaire de connaître les caractéristiques socio-économiques du bassin.

### **I. Les facteurs humains et économiques du bassin**

Le bassin du Niaoulé est une zone en mutation continue à cause de l'accroissement de la population ainsi que les différentes activités qui y sont exercées. Cette situation est surtout perçue dans la commune de Missirah qui joue un rôle important dans l'économie de la région de Tambacounda. Dans cette partie, nous avons utilisé les données socio-économiques collectées sur le terrain à partir du questionnaire, des entretiens, et auprès des services techniques de l'État.

#### **1.1. La population du bassin**

Comme mentionné dans la méthodologie d'enquêtes, le bassin du Niaoulé est à cheval entre cinq communes. Toutefois, nous constatons que l'une des cinq communes peut être exemptée dans l'analyse de la démographie du bassin. Il s'agit de la commune de Bala qui occupe une infime partie et qui ne dispose d'aucune localité sous l'emprise du bassin. La carte 8 montre clairement que la commune de Bala, avec l'absence de localité dans le bassin, exerce une influence démographique insignifiante dans celui-ci. Aussi, il ne faudrait pas perdre de vue la forte concentration de la population à côté du réseau hydrographique, la Route Nationale et auprès, des bas-fonds (carte 8).



**Carte 7:** La zone du bassin du Niaoulé

La population totale des quatre (04) communes (Missirah, Koar, Netteboulou et Goumbayel) prises en compte est estimée à 69 709 habitants par l'ANSD lors du dernier recensement qui date de 2013 (ANSD, 2014). Cette population est dominée par les femmes qui constituent 59%. L'effectif des hommes est estimé à 37 062 soit 41% de la population totale. Cette situation est due au phénomène de migration constatée surtout chez les jeunes. Les entretiens ont révélé une forte connotation migratoire de certaines ethnies à l'image des « Diakhankés » et des « Soninkés ». Ces migrations sont suscitées par la poursuite des études ou la quête de conditions de vie meilleures. Les effectifs de la population de la zone du bassin sont donnés dans le tableau 31.

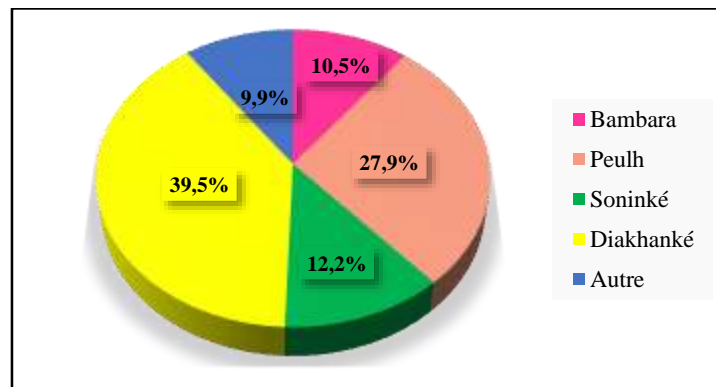
**Tableau 31 :** Répartition de la population de la zone du bassin du Niaoulé

Communes	Population (hbts.)	Population (%)	Nbre. d'hommes	Nbre. de femmes
<b>Netteboulou</b>	18696	27	9222	9474
<b>Koar</b>	4129	6	4383	8512
<b>Missirah</b>	41659	60	20788	20871
<b>Goumbayel</b>	5224	7	2668	2556
<b>Total</b>	<b>69709</b>	<b>100</b>	<b>37062</b>	<b>41412</b>

Source : (ANSD, 2013)

La commune de Missirah est la plus peuplée (60 % de la population totale de la zone du bassin) et présente le plus grand nombre de localités dans le bassin. D'ailleurs c'est l'une des raisons qui justifie son choix comme zone d'enquête.

Les résultats de nos enquêtes nous ont révélé que la population est composite et hétérogène. Ainsi, nous pouvons identifier principalement quatre (04) ethnies à savoir : *Diakhanké, Peulh, Bambara et Soninké*. Nous distinguons également d'autres ethnies minoritaires constituées par *les Wolofs, les Sérères, les Bassaris, etc.* Toutefois, les ethnies *Diakhanké* et *Peulh* dominent le bassin (figure 23).

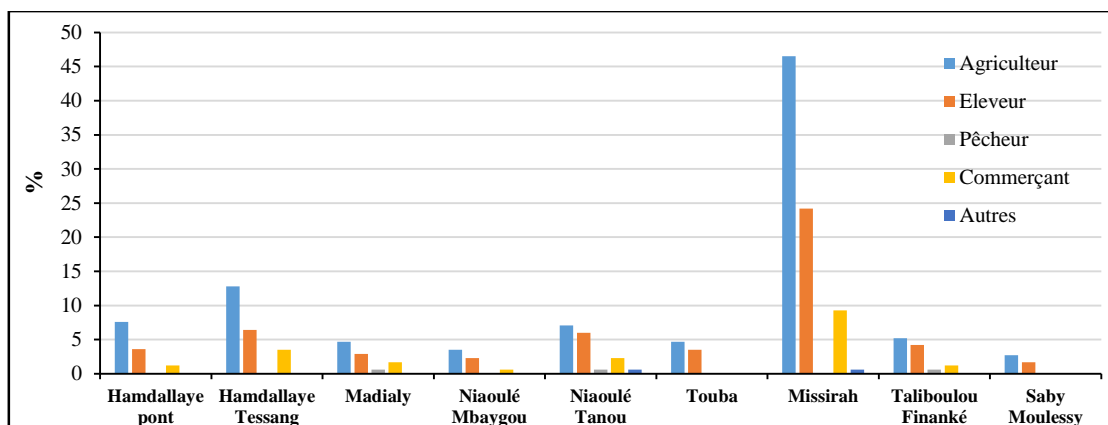


**Figure 23 :** Appartenance ethnique des personnes interrogées (Source : Résultats d'enquêtes, 2021)

Nous tenons également à préciser que la religion musulmane domine dans la commune de Missirah avec 97,5% contre quelques catholiques (2,5%) qui l'on retrouve principalement dans les périmètres bananiers de Nguène Saal, Koar et Sankagne.

## 1.2. Les activités socio-économiques

Les activités qui se déroulent dans le bassin tournent essentiellement autour de l'agriculture, l'élevage, le commerce et la pêche. D'autres activités à l'image de l'artisanat ainsi que l'exploitation forestière existent aussi dans le bassin. La figure 24 donne une idée sur les différents secteurs d'activités du bassin selon les localités d'enquête.

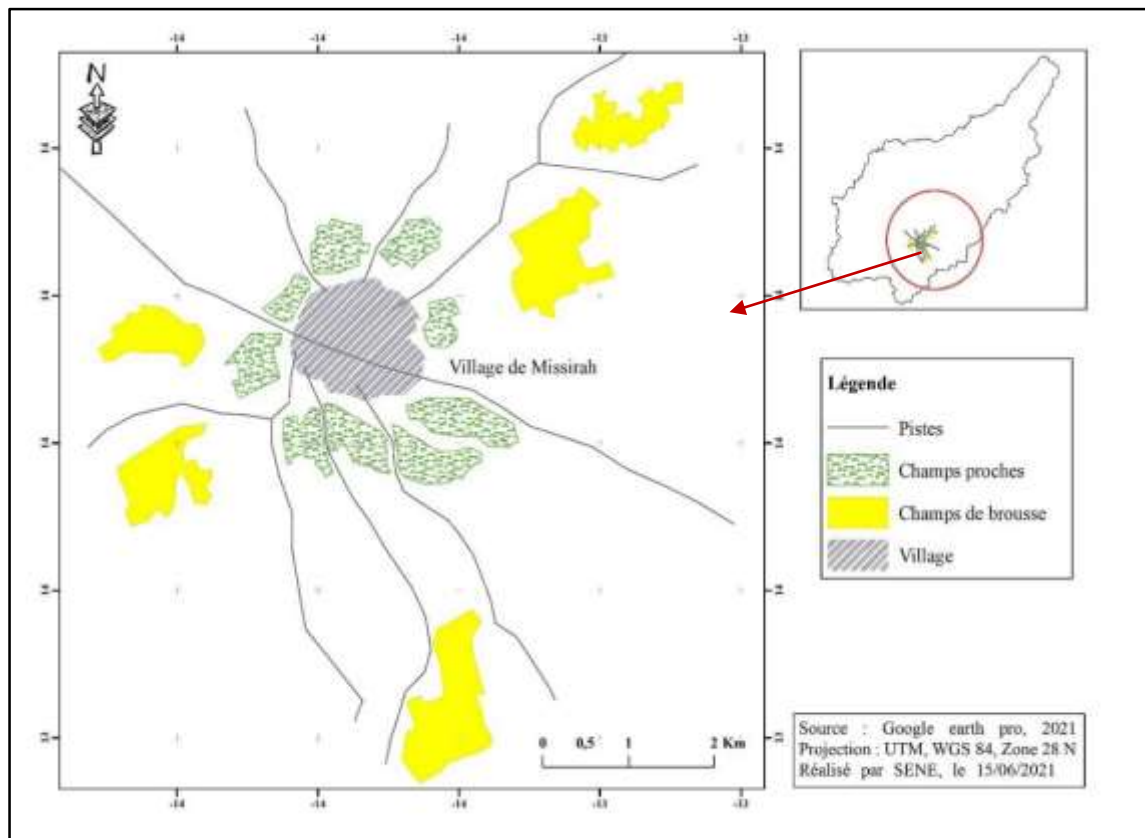


**Figure 24 :** Distribution des activités socio-économiques selon les localités (Source: Résultats d'enquêtes, 2021)

### 1.2.1. L'agriculture

L'agriculture constitue la principale activité pratiquée par les habitants du bassin du Niaoulé avec une panoplie de système de production. Les activités agricoles sont pratiquées dans toutes les localités d'enquête du bassin (figure 24). L'agriculture sous-pluie qui est la plus pratiquée (97,5% des paysans enquêtés) est parfois associée au maraîchage (49,1% des paysans enquêtés) qui s'amplifie davantage dans le bassin. L'agriculture de décrue est devenue insignifiante (3,5%) à cause de la diminution des eaux de surface. Globalement les espaces agricoles sont homogènes car les terroirs de culture explorés sont presque identiques dans tous les villages du bassin. L'espace agricole est structuré en champs proches du village et en champs de brousse. Cela laisse apparaître un paysage en auréoles concentriques (Pélissier, 1973) que nous avons essayé de retracer à travers la carte 10. Aussi, la disponibilité des terres arables permet aux habitants du bassin de pratiquer l'agriculture sur de vastes superficies (le plus souvent entre 1 et 10 hectares selon les résultats d'enquêtes). Le maraîchage, quant à elle, est une activité récente dans le bassin et qui tend à se multiplier surtout dans certaines localités. Elle est souvent pratiquée dans de petites portions à l'intérieur des maisons. Néanmoins, nous avons pu explorer de vastes jardins maraichers appartenant souvent à un groupement de femmes ou à des personnes dotées d'une importante capacité financière. En effet, les grandes exploitations maraichères sont assujetties d'énormes dépenses en matière d'exploitation des ressources en eaux souterraines ; mais également avec l'achat de bonnes semences ainsi que les fertilisants et insecticides qui les accompagnent. Nous avons aperçu dans ces domaines des techniques sophistiqués d'exploitation des ressources en eau souterraine avec des dispositifs d'irrigation

alimentés par des kits solaires ainsi que des pompes immergées avec parfois un système de vanne pour l'arrosage ou le stockage au réservoir.



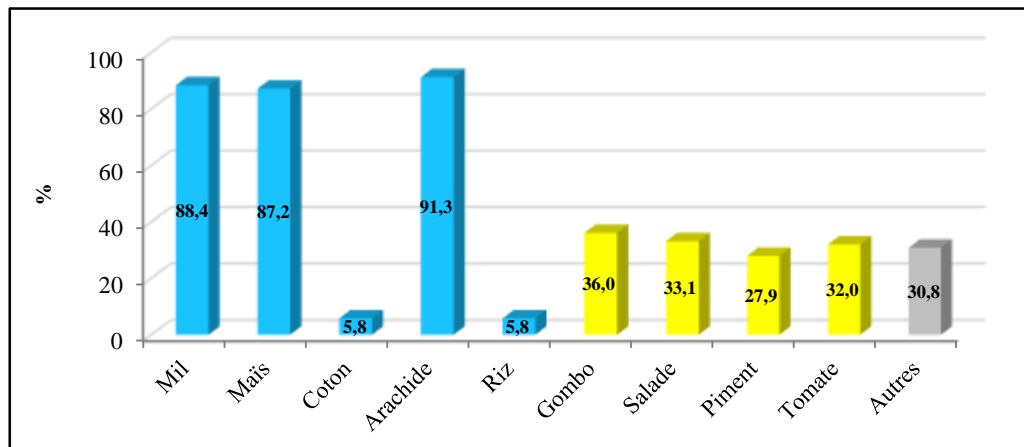
**Carte 8:** Paysage agricole à Missirah en 2021

Les champs peuvent également soutenir le maraîchage en saison sèche si ces derniers abritent un puits avec de l'eau disponible ou un robinet. L'agriculture demeure essentiellement traditionnelle dans le bassin ; l'usage agricole moderne est difficilement remarqué. La taille moyenne des zones de culture par ménage varie entre 1 et 10 ha d'après 91% des personnes interrogées.

La figure 25 montre les spéculations cultivées avec l'agriculture sous-pluie. Nous constatons que dans le bassin du Niaoulé, les spéculations sont nombreuses et variées. Selon les résultats d'enquête, il s'agit principalement de l'arachide (91,3%), du mil (88,4%) et du maïs (78,2%) qui constituent les produits à la base de l'alimentation locale (figure 25). D'autres spéculations à l'image du sorgho, du coton, du riz, du niébé, et du fonio sont également cultivées. En outre, les spéculations maraichères sont constituées par le gombo (36%), la salade (33,1), le piment



(27,9%), la tomate (32%) et d'autres produits tels que l'oignon, la patate douce, l'aubergine, etc.



**Figure 25 :** Les principales spéculations cultivées dans le bassin du Niaoulé (source : résultats d'enquête, 2021)

Malgré tous les atouts en termes d'espaces arables, l'agriculture est essentiellement destinée à la subsistance des habitants. En revanche, elle peut parfois revêtir un caractère commercial et générer par conséquent des revenus pour les paysans lorsqu'il y a un surplus.

### 1.2.2. L'élevage

L'élevage constitue la seconde activité socioéconomique la plus pratiquée dans le bassin du Niaoulé. Il est également pratiqué dans toutes les localités enquêtées surtout dans la zone de Missirah. Globalement, l'élevage est de type extensif et itinérant. Ce caractère extensif de l'élevage est lié à la disponibilité des ressources fourragères et la dispersion des points d'abreuvement du bétail. L'activité pastorale est surtout pratiquée par les Peulhs (sédentaires ou transhumants) qui sont réputés être de grands éleveurs. Nous avons constaté aussi l'importance des éleveurs transhumants due à l'existence du marché hebdomadaire (« louma ») de Missirah destiné exclusivement au commerce du bétail. Le cheptel est composé de bovins (47,1% selon les résultats d'enquêtes), de caprins (49,4%), d'ovins (46,5%), de volailles (40,1%), d'asins (36%) et d'équins (27,3%). Les photos 1 affichent quelques types d'animaux élevés dans le bassin du Niaoulé.



**Photo 1** : Troupeau de vaches à Hamdallaye Pont (A) et Troupeau de moutons à Saby Moulessy (B) (Cliché SENE, février 2021)

Les données recueillies auprès du poste vétérinaire de Missirah révèlent une importance des effectifs de bétail appartenant aux éleveurs sédentaires (tableau 32).

**Tableau 32** : Effectifs des espèces élevés dans la commune de Missirah

<b>Espèces</b>	<b>Effectifs</b>
Bovins	30000
Caprins	11000
Équins	2000
Asins	1900
Ovins	9000

(Source : poste de vétérinaire de Missirah, 2009)

Malgré l'absence du chiffre sur les volailles, l'aviculture villageoise est une activité très importante et qui s'intensifie avec l'amélioration des poulaillers traditionnels et l'élevage des poulets de chairs.

### **1.2.3. La pêche**

La pêche est une activité pratiquée par un faible nombre d'habitants du bassin. Pratiquée par les hommes, la pêche est fortement dépendante du Niaoulé qui joue un rôle important pour cette activité (92,7% de l'échantillon). La pêche dans le Niaoulé se fait au filet ou à la ligne avec l'absence de pirogue. L'appréciation de la taille des poissons capturés varie selon les aspirations de chaque individu. Par exemple, les poissons affichés sur la photo 3 sont perçus comme de gros poissons pour certains ; alors que pour d'autres, leur taille est moyenne à petite (photo 2). Les prises sont soit autoconsommées, offertes ou parfois vendues en cas d'excédent. La production halieutique est très faible.



**Photo 2 :** Poissons pêchés entre Niaoulé Tanou et Gouloumbou (Cliché SENE, février 2021)

#### 1.2.4. Le commerce

Très développé dans le bassin, le commerce est soutenu par les marchés permanents, les marchés hebdomadaires et les boutiques. Le commerce est généralement inhérent activités agropastorales. En effet, les produits commercialisés sont soit agricoles (surtout les produits maraichers), soit pastorales (vente de bétail notamment les chèvres, les moutons et les vaches) et parfois des produits forestiers non ligneux ou des denrées de première nécessité. Cette activité est surtout rendue possible grâce à un système de transport qui obéit à des horaires. Il s'agit notamment de minicars vétustes appartenant aux villages situés aux environs de Missirah. Certains commerçants disposent également de motos à bagage qui leurs permettent d'acheminer leurs marchandises. Rien que le commerce des produits agricoles laisse apparaître d'importantes recettes (tableau 33).

**Tableau 33 :** Production agricole de la communauté rurale de Missirah entre 2008 et 2009

Spécifications	Superficies (en ha)	Productions (en tonnes)	Valeurs ajoutées (en FCFA)
Mil (sanio et souna)	6687,46	8432,88	1 349 261 236
Sorgho	5969,45	7498,53	1 049 793 772
Maïs	2979,13	2818,25	422 738 079
Riz	512,61	1268,72	380 614 849
Fonio	163,96	123,04	0
Arachide	8450,39	7529,29	1 242 332 196
Coton	759,20	854,43	0
Niébé	519,82	388,80	77 760 023
Gombo	1,80	18,02	13 513 410
Patate douce	74,52	596,13	178 840 331

(Source : ANCAR, 2009)

### 1.2.5. D'autres secteurs d'activités

D'autres activités à l'instar de l'artisanat et de l'exploitation forestière sont également identifiées dans le bassin du Niaoulé.

L'artisanat occupe une petite partie de la population active du bassin. Nous pouvons identifier trois (03) catégories d'artisanat. Il s'agit :

- de l'artisanat de production qui regroupe les maçons, les cordonniers, les tailleurs, etc. ;
- de l'artisanat de service constitué par les ferrailleurs, les soudeurs métalliques, les mécaniciens, etc. ;
- de l'artisanat d'art (sculpteurs, peintres, etc.).

L'exploitation forestière repose sur l'extraction de la gomme « Mbep » ou *Sterculia setigera*, la coupe du bois de chauffe et de service, la production de charbon de bois pour ne citer que ceux-là.

## II. Les usages de l'eau dans le bassin du Niaoulé

### 2.1. Des eaux de surface faiblement utilisées

Dans le bassin du Niaoulé, les eaux de surface sont constituées d'un cours d'eau (le Niaoulé) et des mares qui tarissent en saison sèche. Environ 98,8% des personnes interrogées estiment que l'évolution des eaux de surface est à la baisse. Cette baisse est corrélée à celle de la pluviométrie et la forte évaporation qui impose un tarissement précoce et une faiblesse de l'écoulement (tableau 34).

**Tableau 34 :** Fréquence des réponses expliquant la baisse des eaux de surface dans le bassin du Niaoulé

Raison de la baisse des eaux de surfaces	Nb. cit.	Fréquences
Baisse de la pluie	163	<b>94,8</b>
Forte évaporation	141	<b>82,0</b>
Faiblesse de l'écoulement	94	<b>54,7</b>
Baisse du volume d'eau	23	13,4
Tarissement précoce	120	<b>69,8</b>
Autre	16	9,3
Total obs.	172	100

(Source : résultats d'enquête, 2021)

La diminution des eaux de surface est plus marquante pendant la période allant de 1976 à 1995. Cette situation persiste également après cette période. Néanmoins, dans certaines localités à l'image de Niaoulé Tanou et Taliboulou Finanké, le constat est différent (tableau 35). Cela s'explique par le phénomène de blocage des eaux du Niaoulé en amont du pont routier (photo 3).



**Photo 3 :** Le Niaoulé en amont du pont (A), le pont de Niaoulé Tanou (B), et le Niaoulé en aval du pont (C) (Cliché SENE, février 2021)

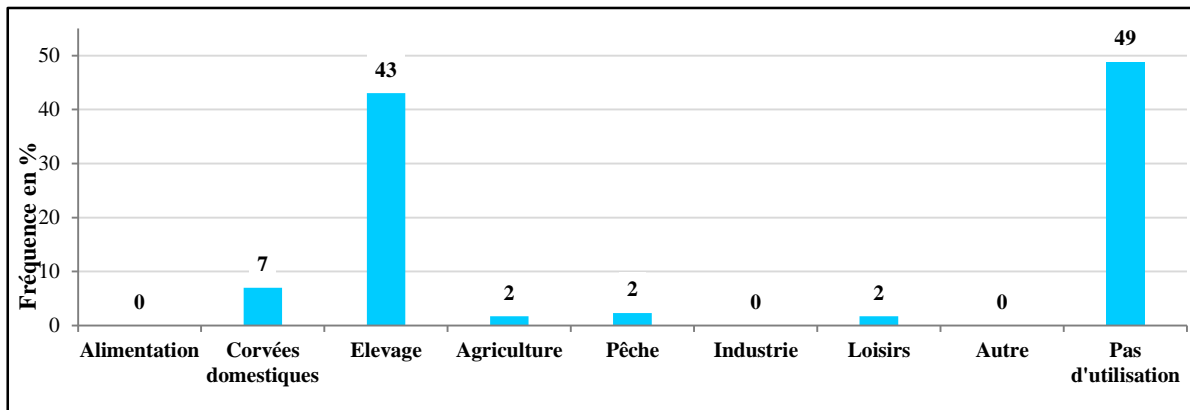
Depuis le blocage des eaux au pont de Niaoulé Tanou, plus de 70 % des personnes interrogées dans les localités de Niaoulé Tanou et de Taliboulou Finanké constatent une augmentation des eaux de surface (tableau 35). Cette dernière se manifeste par la présence quasi permanente de l'eau et l'augmentation du volume en amont du pont. D'ailleurs, les personnes interrogées dans les villages situés en aval soulignent une diminution des ressources en eau de surface liée au bouchage du chenal en amont.

**Tableau 35 :** Constats sur l'évolution des eaux de surface par localité dans le bassin du Niaoulé en pourcentage

Évolution des eaux de surface par localité	Baisse	Augmentation	Stabilité	Total
Hamdallaye Pont	100	0	0	100
Hamdallaye Tessang	100	0	0	100
Madialy	100	0	0	100
Niaoulé Mbaygou	100	0	0	100
Niaoulé Tanou	92,9	<b>78,6</b>	0	100
Touba	100	0	0	100
Missirah	100	0	1,2	100
Taliboulou Finanké	80	<b>70</b>	0	100
Saby Moulessy	100	0	0	100
<b>Total</b>	98,3	10,5	1,7	100

(Source : Résultats d'enquêtes, 2021)

L'ensemble de ces constats font que les eaux de surface sont loin d'être utilisées de manière optimale. La figure 26 montre le poids de chaque utilisation des eaux de surfaces du bassin du Niaoulé. Ainsi, il apparaît clairement que près de 50% des personnes interrogées n'utilisent pas ces types d'eau et les utilisations pastorales sont les plus marquants.



**Figure 26 :** Utilisations des eaux de surface dans le bassin du Niaoulé (source : résultats d'enquêtes, 2021)

### 2.1.1. Les usages domestiques

Dans le bassin du Niaoulé, les usages domestiques liés aux eaux de surface sont globalement d'une moindre importance. Ils sont dominés par l'utilisation pour les corvées domestiques notamment le linge. Cette situation peut se comprendre dans la mesure où l'on conçoit que certains usages à l'image de la consommation sont plus exigeants en termes de qualité de l'eau. En effet, les eaux de surface sont souvent chargées d'impuretés qui, après certaines utilisations à l'image de l'alimentation, peuvent altérer la santé humaine. Elles ne peuvent être utilisées pour l'alimentation, sans risque sanitaire, que lorsqu'elles sont bien traitées. Aussi, nous constatons que malgré leur faible proportion, l'usage domestique des eaux de surface occupe la seconde place la plus importante avec une fréquence de 7% des réponses obtenus lors de nos enquêtes. Toutefois, il ne faudrait pas perdre de vue que les usages domestiques de ces eaux sont de plus en plus délaissés. L'eau n'était pas facilement accessible dans certaines parties du bassin et le manque de moyens techniques et financiers obligeaient la population à linge et faire la vaisselle avec ces types d'eau. Mais aujourd'hui, nous notons la disponibilité de l'eau à domicile avec la multiplication des puits et l'avènement des forages, même si cela est loin d'être répandue dans le bassin. Cet accès facilité explique la réduction de l'usage domestique des eaux

de surface. Cette situation a engendré le changement les points d’approvisionnement en eau chez les habitants du bassin (tableau 36).

**Tableau 36 :** Croisement des réponses concernant le changement des points d’eau et la période

<b>Période</b> <b>Variable</b>	<b>Avant 1975</b>	<b>Entre 1975 et 1995</b>	<b>Après 1995</b>	<b>Total</b>
Oui	0	0	97,5	69,2
Non	0	0	2,5	28,5
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

(Source : résultats d’enquêtes, 2021)

### 2.1.2. Les usages productifs

Les usages productifs liés aux eaux de surface du bassin du Niaoulé sont très importants. Ici, les eaux de surface sont principalement utilisées pour satisfaire les besoins pastoraux et agricoles. L’utilisation industrielle des eaux de surface n’existe pas dans la zone d’étude.

Les eaux de surface sont majoritairement utilisées pour l’abreuvement du bétail notamment les bovins. Les résultats de nos enquêtes révèlent que l’utilisation des eaux de surface pour l’élevage représente 43% de la fréquence totale des réponses obtenues des personnes interrogées. En outre, les éleveurs ont tendance à réduire l’utilisation des eaux de surface pour l’abreuvement à cause de la détérioration de la qualité des eaux de surface. Sur 172 personnes enquêtées, 152, soit 88% attestent que la qualité des eaux de surface se détériore davantage (tableau 37).

**Tableau 37 :** Appréciation de la qualité des eaux de surface par rapport au passé

<b>Variable</b>	<b>Nb. cit.</b>	<b>Fréq.</b>
Meilleure	1	1
Plus mauvaise	152	<b>88</b>
Pas de changement	5	3
Ne sait pas	14	8
Total observations	<b>172</b>	<b>100</b>

(Source : résultats d’enquête, 2021)

L'abreuvement des animaux avec les eaux de surface dans le bassin du Niaoulé se fait principalement pendant la saison des pluies. En saison sèche, elles deviennent plus troubles à cause de la diminution du volume d'eau et la prolifération de plantes aquatiques qui, avec les feuilles mortes, peuvent envahir les eaux et engendrer sa dégradation (photo 4).



**Photo 4 :** Présence de nénuphars dans les eaux du Niaoulé en saison sèche (Cliché SENE, février 2021)

Entre autres facteurs de dégradation des eaux du Niaoulé, nous pouvons souligner les dépôts d'ordures sur le réseau hydrographique effectué par les populations du bassin. En réalité, lors de notre descente sur le terrain, nous avons pu constater des tas d'immondices déposés sur le chenal du Niaoulé notamment au niveau des ponts (photo 5). Cet acte peut contribuer à la dégradation de la qualité des eaux de surface.



**Photo 5 :** Tas d'ordures sur le réseau hydrographique du Niaoulé en saison sèche (cliché SENE, février 2021)



L'utilisation des eaux de surface pour des fins agricoles est négligeable. Elle ne représente que 2% de la fréquence totale des réponses d'enquêtes. Cela permet de noter une faiblesse dans l'utilisation agricole des eaux de surface dans le bassin du Niaoulé. L'agriculture de décrue est insignifiante et l'irrigation des champs avec les eaux de surface n'est pas pratiquée dans le bassin.

### 2.1.3. Les usages in situ

Les usages in situ regroupent l'ensemble des utilisations qui emploient l'eau comme support. Ces usages ne nécessitent pas des prélèvements de l'eau. Dans le bassin du Niaoulé, ils sont d'une moindre importance et s'identifient à travers la pêche et parfois les baignades effectuées par les enfants surtout en saison pluvieuse. La pêche sur le Niaoulé ne requiert pas de pirogues ; les pêcheurs utilisent des filets implantés sous les eaux du Niaoulé. La navigation à la pirogue sur le cours d'eau est inexistante, de même que les sports nautiques. De plus, ces usages deviennent de plus en plus rares dans le bassin à cause de l'état de dégradation et le tarissement précoce des eaux du Niaoulé. En effet, l'évolution des eaux de surface est à la baisse et se traduit par un tarissement précoce et une baisse du volume d'eau.

### 2.2. Des eaux souterraines fortement sollicitées

Contrairement aux eaux de surface, l'utilisation des eaux souterraines est largement plus importante dans le bassin du Niaoulé. Elles sont exploitées à l'aide des forages et des puits (tableau 38). La majorité des forages a été réalisée grâce au projet d'approvisionnement en eau potable dans la région de Tambacounda issu de la coopération Sénégal-japonaise en 2012. Le forage de Hamdallaye pont a vu le jour grâce au PUDC en 2014.

**Tableau 38** : Approvisionnement en eau souterraine dans le bassin du Niaoulé

Source d'approvisionnement ?	Nb.cit.	Fréq.
Forage	130	75,6
Puits	170	98,8
<b>Total obs.</b>	<b>172</b>	<b>100</b>

(Source : résultats d'enquête, 2021)

Le tableau 38 montre que les eaux souterraines sont fortement sollicitées par les populations du bassin grâce aux forages et aux puits. Les résultats de nos enquêtes révèlent que sur 172 observations, 170 ménages soit 98,8% s’approvisionnent au puits. De plus, 130 ménages soit 75,6% utilisent l’eau souterraine à l’aide des forages. En effet, la majorité des chefs ménages enquêtés disposent d’un puits. L’exploitation des eaux souterraines est amplifiée par l’avènement des forages dans plusieurs localités du bassin. De plus, dans les localités dépourvues de forage, nous pouvons retrouver un abreuvoir ou un robinet public alimenté par le forage de la localité voisine. En outre, les eaux souterraines sont exploitées à l’aide de pompe manuelle dans certaines localités à l’image de Touba et Madialy.

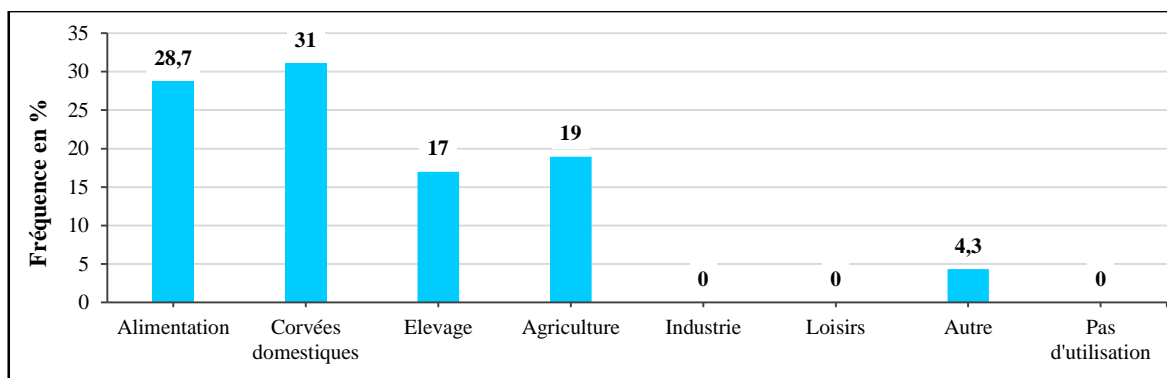
Cependant, l’évolution des ressources en eau souterraine est à la baisse. Les résultats de nos enquêtes ont révélé que sur 172 personnes interrogées 94,8% attestent que la dynamique des eaux souterraines est à la baisse contre seulement 3,5% qui pensent qu’elle est à la hausse. La diminution des ressources en eau souterraine est inhérente à la baisse de la pluviométrie et la forte évaporation. Elle se manifeste ainsi, par l’augmentation de la profondeur des nappes et le tarissement des puits surtout en saison sèche (tableau 39).

**Tableau 39** : Fréquence des réponses expliquant la baisse des eaux de surface dans le bassin du Niaoulé

<b>Facteurs expliquant la baisse des eaux souterraines</b>	Nb. cit.	Fréquence
Baisse de la pluie	157	91,28
Forte évaporation	32	18,6
Augmentation de la profondeur des puits	152	88,37
Tarissement des puits	57	33,14
Autres	7	4,07
Total observation	172	100

(Source : résultats d’enquête, 2021)

Les eaux souterraines sont utilisées à différentes fins dans le bassin du Niaoulé. La figure 27 montre la proportion de chacune des utilisations des eaux souterraines dans le bassin.



**Figure 27** : Utilisations des eaux souterraines dans le bassin du Niaoulé (source : résultats d'enquêtes, 2021)

### 2.2.1. Les usages domestiques

Les usages domestiques des eaux souterraines, regroupant l'alimentation et les corvées domestiques, prédominent avec une fréquence cumulée de 59,7% des réponses obtenues. Cela peut s'expliquer d'une part, par la présence de puits dans presque chaque maison. D'autre part, avec l'arrivée des forages, les ressources en eau souterraine sont de mieux en mieux exploitées pour la satisfaction des besoins domestiques à savoir la cuisson, la boisson, les toilettes, le linge, la lessive, etc. (photo 6). En effet, l'eau n'était pas facilement accessible ; ce qui fait que la consommation domestique de l'eau était minime. Autrefois, il fallait puiser ou aller sur le cours d'eau pour laver son linge, prendre son bain, entre autres. De nos jours, les forages permettent d'avoir de l'eau de robinet chez soi dans certaines localités à l'instar de Missirah et/ou de bénéficier d'un robinet public. Ainsi, l'eau à domicile et au robinet est une invention récente dans le bassin qui aujourd'hui, est encore loin d'être répandue. Cet accès facilité à l'eau en a augmenté la consommation qui cesse de croître sous l'effet de la croissance démographique observée dans le bassin du Niaoulé.



**Photo 6** : Usages domestiques des eaux souterraines dans le bassin du Niaoulé (Cliché SENE, 2021)

### 2.2.2. Les usages productifs

Les usages productifs liés aux eaux souterraines du bassin du Niaoulé sont également importants. Les eaux de la nappe sont utilisées, ici, pour le maraîchage et l'abreuvement des animaux. L'utilisation industrielle des eaux de surface n'existe pas dans la zone d'étude d'après les résultats d'enquêtes (figure 27).

Dans le bassin du Niaoulé, les éleveurs ont tendance à abreuver les animaux avec les eaux souterraines. En effet, la mauvaise qualité des eaux de surface les oblige à abreuver les animaux au puits ou au niveau des abreuvoirs alimentés par les forages (photo 7 et 8). D'après Mahamadou Sylla, ancien responsable du développement local, « *les eaux du Niaoulé sont maintenant devenues mauvaises ; lorsque les vaches les boivent, elles tombent malades. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle je ne laisse pas les vaches les boire ; je les abreuve avec l'eau du forage surtout en saison sèche* ». Ce constat est le même pour tous les éleveurs avec qui nous nous sommes entretenus. D'ailleurs, nous notons une forte présence de puits accompagnés d'abreuvoir dans toutes les localités explorés du bassin. L'utilisation pastorale des eaux de la nappe est surtout facilitée par les abreuvoirs alimentés par les forages.



**Photo 7 :** Abreuvement d'un cheval au puits à Taliboulou Finanké



**Photo 8 :** Abreuvoir alimenté par le forage de Hamdallaye Pont

De l'autre côté, nous avons les utilisations agricoles des eaux souterraines qui représentent 19% de la fréquence des réponses. Ici, les eaux de la nappe sont utilisées pour le maraîchage en saison sèche. Ce dernier prend de plus en plus de l'ampleur dans le bassin surtout dans la localité de Missirah. Les maraichers utilisent fortement les eaux souterraines à travers les puits (photo 9 A) ou le robinet (photo 9 B) alimenté par le forage. Cette exploitation des ressources en eau souterraine est tributaire de l'ampleur du jardin maraîcher et des moyens financiers et matériels. Les exploitants qui ont un jardin plus vaste et plus de moyens utilisent souvent des motopompes (photo 9 C) ou des pompes immergées dans les puits et alimentées par des panneaux solaires

(photo 9 D). D'autres qui ont des moyens relativement limités puisent manuellement ou branchent un tuyau au robinet pour arroser leur jardin. Toutefois, le maraîchage n'est pas aussi développé dans certaines localités du bassin à cause du manque d'eau et des moyens limités. D'après nos entretiens, la rareté des ressources en eau ne permet pas aux habitants du village de Niaoulé Mbaygou à pratiquer le maraîchage.



**Photo 9** : Méthode d'exploitation des eaux souterraines pour le maraîchage dans le bassin du Niaoulé (Cliché SENE, février 2021)

Les usages productifs liés aux eaux de la nappe deviennent de plus en plus importants grâce au développement du maraîchage et à l'émergence de l'élevage dans les maisons. Ce type d'élevage apparaît comme une stratégie de lutte contre les vols et la diminution des eaux de surface dans le bassin.

### **Conclusion partielle**

À cette étape de notre réflexion, il apparaît clairement que le bassin du Niaoulé constitue un espace en pleine croissance avec l'importance des activités socio-économiques qui s'y développent. Cette situation, occasionnée par l'importance des potentialités du milieu physique et démographique, offre une diversité d'utilisations des ressources en eau.

Les utilisations des ressources en eau sont regroupées en trois catégories notamment les usages domestiques, les usages productifs et les usages in situ. L'analyse des usages a révélé que chaque utilisation des ressources en eau du bassin nécessite un certain niveau de qualité et de quantité. Par exemple, les utilisations de l'eau pour l'alimentation, l'abreuvement du bétail et les baignades sont plus exigeantes en termes de qualité sanitaire par rapport à l'utilisation pour le maraîchage. Ce qui fait que les eaux souterraines sont plus privilégiées pour ces usages d'autant plus que la majorité des personnes interrogées à ce propos souligne que leur qualité est meilleure que celles de surface. Toutefois, les usages domestiques de l'eau dominent dans le bassin.

## **Chapitre 6 : Les impacts de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio-économiques et les stratégies d'adaptation dans le bassin versant du Niaoulé**

---

Les ressources en eau occupent une place cruciale dans le développement des activités socio-économiques. Aujourd'hui, ces ressources sont soumises à de fortes pressions en raison de la croissance démographique et du développement économique. De plus, la diminution de la pluie affectant à la fois la disponibilité des eaux de surface et souterraines, occasionne des effets non négligeables sur certaines activités exercées dans le bassin du Niaoulé. Cela a amené les populations du bassin à mettre en place des stratégies d'adaptation. C'est d'ailleurs les deux principaux axes qui vont être analysés dans ce chapitre avec la combinaison de l'ensemble des résultats issus du traitement de différentes données utilisées.

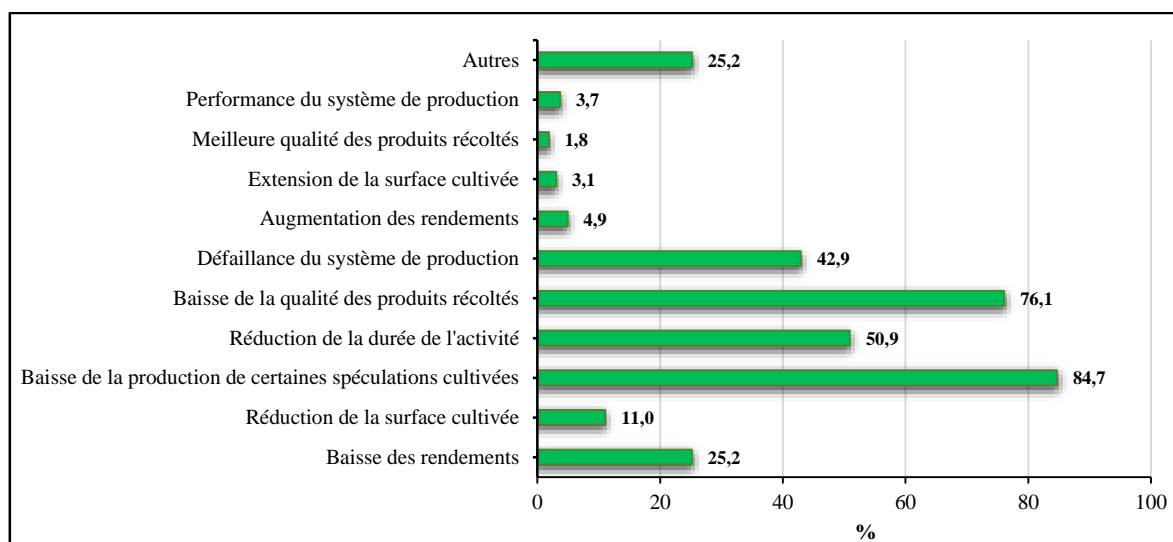
### **I. Les impacts de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio-économiques dans le bassin du Niaoulé**

Dans le bassin du Niaoulé, les principales activités socio-économiques impactées par la dynamique des ressources en eau sont l'agriculture, l'élevage et la pêche continentale. En effet, ces dernières sont fortement dépendantes des eaux pluviales, fluviales et souterraines pour leur bon déroulement. Or, l'irrégularité pluviométrique constatée depuis le début des années 1970 constitue un obstacle au développement de ces activités. D'ailleurs, la perception populaire de l'évolution de la pluviométrie dans le bassin traduit une baisse (98,3% de l'échantillon) constatée dans les décennies 1970, 1980 1990 (97,7%). De plus, la saison pluvieuse est marquée par une installation tardive (94,2% de l'échantillon), un arrêt précoce (92 %) et un raccourcissement des jours de pluie (74,4%) qui occasionne des séquences sèches pendant l'hivernage. Cette situation a ainsi occasionné une batterie d'effets dans l'agriculture, l'élevage et la pêche.

#### **1.1. L'agriculture, une activité devenue incertaine dans le bassin**

Constituant la principale activité économique exercée dans le bassin, l'agriculture est essentiellement pluviale ; d'où une dépendance des conditions pluviométriques de la zone. Selon, les résultats d'enquête, 90,7% des personnes interrogées constatent une baisse des

ressources en eau disponibles pour l'agriculture contre 4,1% qui pensent le contraire. Cette situation a ainsi engendré des effets sur les activités agricoles (figure 28).



**Figure 28** : Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur l'agriculture dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021)

### 1.1.1. La baisse de la production de certaines spéculations cultivées

La diminution des ressources en eau disponible pour l'agriculture a occasionné la baisse voire l'arrêt de la production de certaines spéculations cultivées (selon 84,7% des agriculteurs interrogés). En effet, ces dernières sont souvent exigeantes en matière d'eau pour leur croissance. Il s'agit notamment du riz, du coton dont le nombre de producteurs diminue continuellement.

De nos jours, seule une faible quantité de riz pluviaux continue à être produite dans le bassin d'après nos investigations sur le terrain. Cette production est généralement effectuée par des groupements de femmes souvent accompagnées par des structures à l'image de l'ISRA ou l'ANCAR, dans le cadre d'un projet. De plus, la riziculture inondée n'est plus envisageable dans le bassin. En fait, la baisse de la pluie et la forte évaporation ont affecté les eaux de surface du bassin, à tel enseigne que ces dernières ne peuvent plus ruisseler parfaitement pour inonder les champs destinés à la riziculture et pendant un bon moment. C'est cette situation qui oblige certains paysans à abandonner progressivement la culture du riz.

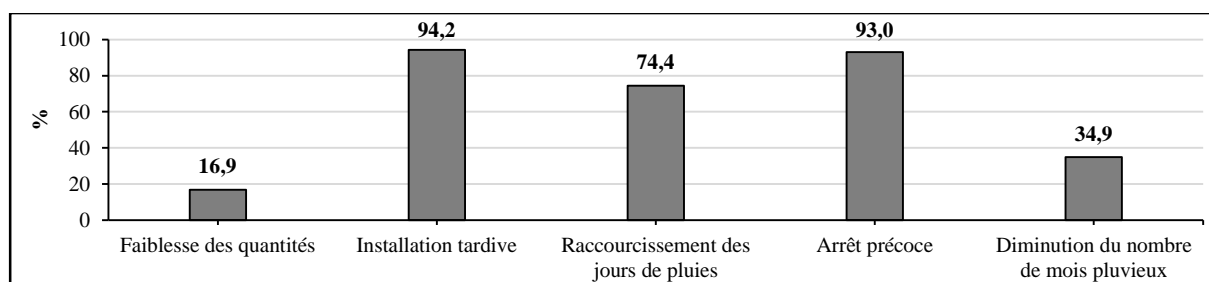
De même, la production du coton connaît un recul qui s'explique par divers facteurs. Le coton fait partie des cultures qui consomment une quantité importante d'eau. Ainsi, la baisse de cette

ressource affecte la production de cette spéculation et oblige certains cultivateurs à s'en désintéresser. Cependant, la diminution des ressources en eau ne constitue pas la seule raison. La majorité des paysans interrogés fustigent les pratiques mises en œuvre par la SODEFITEX notamment avec la hausse des prix des intrants et semences et leur mauvaise qualité. Cette situation les sombrent dans l'endettement et les obligent à stopper progressivement la culture du coton et à prioriser les cultures vivrières.

Les enquêtes ont également révélé une tendance au délaissement des certaines variétés à cycle long. Il s'agit notamment des variétés tardives du mil, du sorgho et de l'arachide. Cette situation est surtout expliquée par le raccourcissement de la saison pluvieuse qui affecte aussi la qualité des produits.

### 1.1.2. La défaillance du système de production

L'approche fréquentielle adoptée pour analyser la saison pluvieuse dans la zone du bassin a montré un raccourcissement de celle-ci (cf. Première partie / Chapitre 2). Ce raccourcissement est induit par le caractère tardif du début de la saison des pluies et la précocité de sa fin. La saison pluvieuse commence le plus souvent dans la deuxième quinzaine du mois de juin et se termine au début du mois d'octobre dans la zone du bassin. Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par les enquêtes de terrain sur l'appréciation de la saison pluvieuse (figure 29). Cette dernière est affectée par une installation tardive (94,2 % de l'échantillon) et un arrêt précoce (93 %).



**Figure 29** : Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur l'agriculture dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021)

Ce raccourcissement de la saison pluvieuse a réduit la durée de l'activité agricole (50,9 % de l'échantillon). Cette situation empêche les paysans à créer un surplus important dans la production afin de maximiser leurs profits. De plus, il est connu de tous que les différentes



cultures ont besoin d'eau pendant une durée bien déterminée pour croître et atteindre la maturité. La précarité de la pluviométrie dans le temps peut donc générer des externalités négatives sur les cultures. Ainsi, les cultures peuvent observer une rupture de leur croissance conduisant à la baisse de la qualité des produits récoltés (76,1 % de l'échantillon). En effet, ces ruptures sont amplifiées par l'importance des séquences sèches en saison pluvieuse induites par le raccourcissement des jours de pluie (74,4% de l'échantillon). Le chef du village de Niaoulé Mbaygou nous dit que « Si l'on prend l'exemple de l'arachide, l'irrégularité des pluies peut amener à beaucoup de perte car les graines ne grossissent pas pour remplir la coque et cela expose le produit à sa destruction car la coque devient fragile. Dans ce cas nous obtenons une production faible car une bonne partie des récoltes ne peut être ni consommée ni commercialisée ». De plus, les ruptures de croissance sont plus fréquentes durant les phases critiques du développement des cultures (Sané, 2003). Alors, la régularité des précipitations pendant l'hivernage s'avère efficace pour le bon déroulement du cycle végétatif.

L'ensemble de ces effets exprime une défaillance du système de production (constaté par 42,9 % des paysans) pour l'agriculture pluviale qui occupe la majorité des actifs du bassin. D'après nos entretiens réalisés auprès des personnes âgées, les récoltes pouvaient rester dans les greniers de bonnes lueurs et assurer la subsistance de la communauté avant la sécheresse. La sécheresse a tellement perturbé le système de production à tel point que les insuffisances étaient atténuées par l'importation des produits vivrière. De nos jours, avec le retour des conditions plus humide dans les années 2000 et le développement des moyens et techniques agricole, les rendements ne dépendent pas uniquement de la quantité d'eau précipitée.

### **1.1.3. D'autres externalités sur l'agriculture**

La diminution des ressources en eau pour l'agriculture peut également avoir des incidences sur les rendements agricoles ainsi que les superficies cultivées.

La figure 28 montre que 25,4 % des agriculteurs interrogés constatent une baisse des rendements agricoles contre 4,9 % qui disent le contraire. Cette baisse des rendements est partiellement liée au à la diminution des ressources en eau. En effet, les rendements dépendent de plusieurs facteurs à savoir la fertilité des sols, la nature de la pluie, la qualité des semences, les équipements agricoles utilisés pour ne citer que ceux-là. Ainsi, les paysans qui n'ont pas accès à un niveau d'équipements agricoles relativement sophistiqués et qui n'ont pas assez de moyens financiers pour l'achat d'engrais observent souvent une baisse des rendements. Alors,

cette catégorie de paysans ne compte que sur la pluie et utilise des pratiques anciennes pour fertiliser leurs champs (compostage naturel avec les déjections bovines). Par contre, d'autres paysans constatent une hausse des rendements qui s'explique surtout par l'usage des engrais, la bonne qualité des semences et parfois aussi l'abondance de la pluie.

De même, certains paysans affectés par une insuffisance de moyens financiers et matériels sont obligés de réduire la surface cultivée d'autant plus que les conditions pluviométriques sont souvent défectueux. Cependant, certains paysans réduisent les superficies cultivées car ils aspirent à changer le système d'agriculture extensive à celle intensive. Cette dernière est fondée sur l'optimisation de la quantité produite par rapport à la surface utilisée et au temps de travail nécessaire.

En outre, avec la croissance démographique, les populations sont obligées de cultiver pour satisfaire les besoins alimentaires et tirer plus de profits par rapport à l'activité. De plus, le retour vers des conditions pluviométriques plus humides (constatées à partir de 2003), l'existence de moyens matériels et financiers ainsi que l'accompagnement technique de certaines structures à l'image de l'ANCAR permettent d'étendre les cultures sur une surface plus grande. Alors, l'extension de surfaces cultivées ou sa rétraction dépend surtout des moyens financiers, matériels et techniques propres à chaque cultivateur.

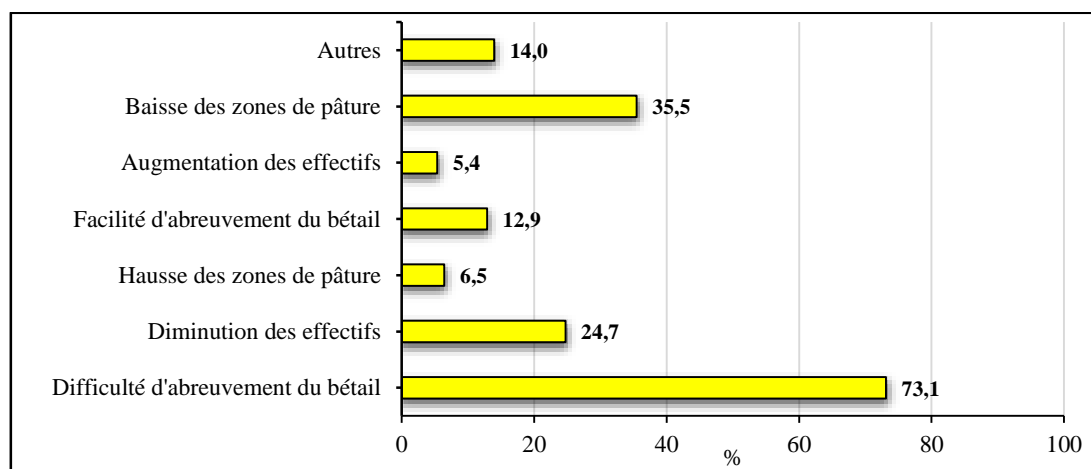
Entre autres conséquences de la dynamique des ressources en eau sur cette activité, nous pouvons souligner l'abandon de l'agriculture de décrue. En effet, ce type d'agriculture a été expérimenté jadis par quelques anciens avant la sécheresse (selon les entretiens). D'après eux, en période de crue, les eaux du Niaoulé débordaient et inondaient les champs. En revanche, *« depuis la sécheresse cette pratique n'est plus possible car les eaux de surface sont devenues tellement faibles et disparaissent vite, ce qui fait qu'elles ne peuvent plus déborder pour inonder les champs »*.

Par contre, les conséquences de la baisse des ressources en eau ne sont pas uniquement négatives. Le bassin du Niaoulé était confronté à une sous-exploitation des eaux souterraines. Cette dernière conjuguée à la baisse de la pluviométrie rendait difficiles les conditions de vie de la population du bassin d'autant plus que l'agriculture constitue l'activité qui regroupe la majeure partie des actifs de cette population. La ressource en eau devenait de plus en plus rare. La seule alternative était l'exploitation des eaux souterraines qui malgré leur baisse pouvait satisfaire les besoins en eau des populations. Dès lors, le forage de puits s'est multiplié dans le

bassin. De plus, l'État du Sénégal en collaboration avec le Japon a instauré des forages dans plusieurs localités du bassin à partir de 2012. À cela s'ajoutent les forages du PUDC à l'image de celui de Hamdallaye Pont installée en 2014. La multiplication des puits et la mise en place des forages ont augmenté l'exploitation des eaux souterraines et par conséquent facilité l'accessibilité à la ressource. Cela a permis le développement des activités agricoles en saison sèche sous une autre forme appelée le maraîchage. Ce dernier est récent dans le bassin et prend progressivement de l'ampleur. De nos jours, plus de 49% des agriculteurs pratiquent le maraîchage grâce à un système d'arrosage alimenté par les puits ou par les robinets ravitaillés par le forage. Les paysans adoptent de plus en plus des systèmes d'arrosage plus moderne que jadis.

## 1.2. Des activités pastorales relativement bouleversées

L'eau constitue un élément essentiel à la subsistance animale. Elle est indispensable au développement du fourrage ainsi que l'abreuvement pour les animaux. Dès lors, l'évolution des ressources en eau influe directement sur les activités pastorales.



**Figure 30 :** Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur l'élevage dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021)

### 1.2.1. La difficulté d'abreuvement du bétail

La diminution des ressources en eau de surface est devenue un phénomène réel dans le bassin du Niaoulé. Elle se manifeste surtout par la faiblesse des volumes d'eau et le tarissement précoce des points d'eau. Cette situation a rendu difficile l'abreuvement du bétail. L'abondance de la pluie observée avant la sécheresse permettait aux éleveurs d'abreuver le bétail au niveau

du cours d'eau et des mares pendant presque toute une année. Ainsi, l'abreuvement était plus facile et plus bénéfique car ils ne payaient rien pour que le bétail boive au niveau du cours d'eau ou dans les mares. Cependant, cette situation n'est plus la même. De nos jours le cours d'eau ainsi que les mares deviennent de plus en plus temporaires. Dès lors, ils ne servent d'abreuvoir, pour le bétail, que pendant la saison des pluies. Pendant la saison sèche, ces eaux deviennent d'abord troubles avant de tarir. Cet aspect peut constituer un facteur de risque pour la santé des animaux. Cela est d'ailleurs confirmé par les entretiens effectués auprès des personnes ressources (l'agent responsable de l'élevage, le vétérinaire et l'ancien responsable du développement local) qui précisent une recrudescence de maladies chez les vaches qui s'abreuvent au niveau des eaux de surface durant cette période. Cette thèse est à démontrer avec une étude microbiologique sur la qualité des eaux de surface en saison sèche.

Pendant la saison sèche, le bétail est approvisionné en eau au niveau des puits ou des abreuvoirs alimentés par un forage. Cette situation amplifie la difficulté de l'abreuvement du bétail. En effet, le bassin est également marqué par une diminution des eaux souterraines qui se manifeste par une augmentation de la profondeur des puits (88,4 % de l'échantillon) et parfois souvent leur tarissement (33,1 % de l'échantillon). Cette situation complique le puisage de l'eau à tel enseigne que les villageois ont parfois recours à l'âne (photos 10).



**Photo 10** : Puisage à l'âne destiné à l'abreuvement des vaches à Saby Moulessy (Cliché SENE, février 2021)

De plus, les observations directes effectuées sur le terrain nous ont permis de constater de visu le phénomène de tarissement des puits. Nous avons pu repérer au moins un puits sec dans presque tous les villages explorés (photos 11A, B et C). Cette situation complique davantage l'abreuvement des animaux surtout en saison sèche.



**Photo 11 :** Puits sec abandonné en saison sèche respectivement dans les villages de Hamdallaye Tessang (A), Missirah (B) et Niaoulé Mbaygou (C) (Cliché SENE, février 2021)

Certains éleveurs soulignent également une difficulté relative à l’abreuvement du bétail, notamment avec l’approvisionnement au niveau des abreuvoirs alimentés par le forage. En réalité, les forages ne fonctionnent pas tout le temps. Ils sont souvent affectés par des pannes qui obligent les pasteurs à patienter pendant un bon moment pour abreuver le bétail notamment les bovins. Aussi, les éleveurs peuvent observer un retard dans l’approvisionnement du bétail lié à l’absence du conducteur du forage. D’ailleurs, nous avons pu rencontrer un pasteur à Niaoulé Mbaygou qui attendait impatiemment le conducteur pour que ce dernier ouvre les vannes et remplit l’abreuvoir afin que son troupeau de vaches puisse boire. De plus, la majorité des éleveurs fustigent la cherté de l’abreuvement du bétail au forage qui constitue également un obstacle par rapport à l’activité.

En revanche, une minorité d’éleveurs interrogés (12,9%) pensent que l’implantation des forages dans différentes localités du bassin offre une facilité de l’abreuvement du bétail. Avant 2012, la sous-exploitation des eaux notamment celles souterraines était plus accentuée. La baisse de la pluviométrie conjuguée à une forte évaporation rendait l’abreuvement du bétail plus ardu. Par conséquent, l’avènement des forages a rendu plus aisé l’abreuvement du bétail selon certains éleveurs grâce aux abreuvoirs alimentés par ces infrastructures. Rappelons que ces forages, datant de 2012, ont été mis en place dans le cadre du partenariat entre le Sénégal et le Japon pour l’approvisionnement en eau dans la région de Tambacounda. D’autres forages à l’image de celui du village de Hamdallaye Pont ont été érigés en 2014 avec le PUDC.

### **1.2.2. La baisse des zones de pâture**

Dans le bassin du Niaoulé l’alimentation du bétail notamment les bovins, est essentiellement basée sur les pâturages naturels constitués d’herbes et de ligneux. Ces pâturages naturels sont

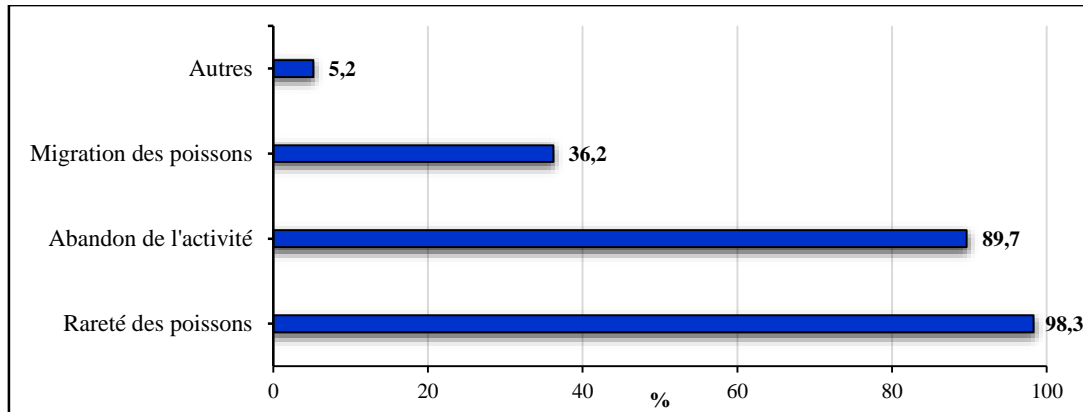
tributaires des conditions bioclimatiques qui définissent la qualité et la quantité du fourrage (Sané, 2003). Ainsi, la péjoration des conditions climatiques constatées au début des années 1970 influe directement sur la disponibilité du pâturage dans la mesure où le climat influe sur la distribution et le comportement saisonnier du végétal (Chamard et Courel (1999). La diminution des ressources en eau peut perturber les différentes phases d'évolution des végétaux ainsi que leur nature qui détermine l'appétence du bétail. Le déficit pluviométrique observé dans le bassin a entraîné des pertes énormes à l'endroit des ressources fourragères. Cette diminution des ressources fourragères est à l'origine de la baisse des zones de pâturage. Cela constitue un obstacle au développement de l'activité pastorale surtout pendant la sécheresse.

La diminution des zones de pâture est également inhérente à l'accroissement démographique qui impose l'extension des champs de culture au détriment des superficies destinées à l'élevage. En effet, les aspirations agricoles de la population du bassin priment sur celle pastorale. L'élevage est surtout considéré comme une source d'épargne pour la majorité des chefs de ménage. Les besoins agricoles obligent les gens à défricher ou brûler les herbes afin d'étendre les zones de cultures. Les feux de brousse débordent le plus souvent et emportent d'énormes quantités de fourrage. Cela entraîne ainsi le rétrécissement des zones pastorales.

En outre, cette diminution des zones de pâture conjuguées à la difficulté d'abreuvement du bétail a occasionné la diminution des effectifs (selon 24,7% des éleveurs enquêtés) chez certains éleveurs. Cette diminution des effectifs est amplifiée par la récurrence des vols observés dans le bassin du Niaoulé. Ces vols de bétails ont été plusieurs fois soulignés lors de nos enquêtes de terrain. Par contre, d'autres éleveurs ont vu les effectifs augmentés (5,4% des éleveurs enquêtés) en raison de l'accessibilité à l'abreuvement avec l'avènement des forages mais également l'augmentation du potentiel fourrager constaté avec le retour de la pluviométrie ces dernières années. Cette situation constitue un cadre favorable à la reproduction et à l'épanouissement du bétail.

### **1.3. La pêche, une activité en déclin dans le bassin**

La pêche continentale effectuée dans le Niaoulé est largement tributaire du cours d'eau. Cette assertion est d'ailleurs appuyée par la perception de 92,7% des personnes interrogées. De ce fait, la faiblesse du cours d'eau induite par la péjoration climatique occasionne des externalités négatives sur l'activité. Ces externalités sont présentées dans la figure 31.



**Figure 31** : Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur la pêche dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021)

### 1.3.1. La rareté des poissons

La diminution de l'intensité et du volume d'eau du Niaoulé a entraîné la rareté des poissons dans le bassin. Avant la sécheresse des années 1970, le tarissement du cours d'eau n'était pas précoce. L'écoulement était quasi-permanent notamment sur le cours principal. Les poissons étaient disponibles avec au moins quatre espèces pêchées sur le Niaoulé. De nos jours, les poissons sont devenus rares au point que les quelques pêcheurs qui se trouvent dans le bassin remontent jusqu'aux environs de Gouloubou pour trouver la ressource. Cette situation est induite par le tarissement précoce observé sur la majeure partie du cours d'eau. Or, il est connu de tous que l'eau est indispensable à la survie des poissons. Grâce aux substances dissoutes (gaz, sels minéraux et composés organiques) et aux particules en suspension (matières organiques, etc.), le poisson peut respirer, se développer et se reproduire. Alors, la faiblesse des disponibilités en eau sur le cours d'eau ainsi que la tendance au dessèchement du bassin révélée par les SPEI, constitue des éléments de réponse aux préoccupations des pêcheurs. Par conséquent, la dynamique hydrologique a négativement affecté la pêche qui devient de plus en plus abandonnée.

En outre, certaines personnes enquêtées pensent que les poissons ont migré dans des zones plus favorables à leur survie. D'après les investigations, la migration des poissons (36,2 % de l'échantillon) s'est faite principalement dans les eaux du Gouloubou (rattaché au chenal principal) et du Niokolo-Koba. D'ailleurs, les quelques pêcheurs qui demeurent dans le bassin du Niaoulé sont parfois obligés de remonter dans ces eaux pour attraper des poissons et subvenir à leurs besoins.

### **1.3.2. L'abandon de l'activité**

De nos jours, nous observons une importante régression de la pêche continentale effectuée dans le bassin du Niaoulé. Cette régression a été occasionnée par la rareté des poissons qui a obligé plusieurs personnes ayant eu à pratiquer la pêche jadis de la cesser.

Parmi les personnes interrogées, 33,7% ont eu à pratiquer la pêche soit 58 chefs de ménage (Source : résultats d'enquêtes, 2021). Toutefois, la diminution des ressources en eau pour la pêche a réduit la disponibilité des poissons. La rareté des poissons a ainsi poussé un grand nombre d'habitants du bassin à abandonner cette activité. En effet, sur la totalité des personnes ayant effectué la pêche continentale, 82,7% l'ont pratiqué avant la sécheresse des années 1970. Pendant cette période, les conditions d'humidité étaient plus favorables avec une disponibilité des eaux de surface pouvant assurer l'existence des poissons. L'entretien effectué avec un vieux pêcheur nous révèle qu'autrefois « *le cours d'eau était rempli d'eau presque toute l'année. C'est la raison pour laquelle, il y avait beaucoup de poisson dans les eaux du Niaoulé et les gens qui habitaient dans les villages proches du cours d'eau se réunissaient souvent pour effectuer des campagnes de pêche* ». Par contre, cette situation s'est détériorée depuis la période de sécheresse. D'ailleurs, 89,7% des personnes interrogées ont eu à abandonner la pêche surtout durant la période 1975-1995.

### **1.4. Une autre externalité**

Entre autres effets de la baisse de ressource en eau du bassin, nous pouvons souligner la dégradation de la ripisylve qui à travers les arbres fruitiers jouait un rôle non négligeable pour les populations. En effet, la ripisylve constitue un groupement végétal fortement tributaire du cours d'eau. Dans le bassin du Niaoulé, ce groupement végétal renfermait des arbres fruitiers à l'image du « maad » (*Saba senegalensis*). Ces fruits étaient souvent cueillis par les populations riveraines uniquement pour la consommation. La baisse des volumes d'eau écoulee par le cours d'eau a ainsi occasionné la dégradation de la ripisylve et la rareté de certains arbres fruitiers que les habitants du bassin avaient l'habitude de consommer.

## **II. Les stratégies d'adaptation face à la baisse des ressources en eau du bassin**

Face à la dégradation des conditions hydriques dans le bassin du Niaoulé, différentes alternatives sont mises en place. Ces dernières sont perceptibles sur chaque secteur d'activité.



## 2.1. Les stratégies d'adaptation agricoles

Pour faire face à la diminution des ressources en eau pour l'agriculture, les impactés utilisent plusieurs stratégies. Le déficit pluviométrique ainsi que l'absence de moyens techniques et financiers pour l'utilisation des eaux de surface ont occasionné des externalités négatives pour l'agriculture pluviale et le maraîchage. Pour amortir les dégâts pouvant découler de cette situation, certains agriculteurs (33,1%) ont opté pour l'irrigation de l'eau du puits ou du robinet (photo 12A). L'irrigation au puits permet à certains agriculteurs de corriger l'irrégularité des besoins en eau pluviale pour les cultures. Pour d'autres, le forage de puits ou l'arrosage au robinet permet de pratiquer le maraîchage en contre-saison. Toutefois, cette stratégie d'adaptation n'est pas dotée à tous les producteurs à cause du phénomène de tarissement des puits qui impose des dépenses parfois énormes. En réalité, cette situation oblige les concernés à souvent creuser à nouveau les puits, l'achat d'une pompe immergée ainsi que le kit d'alimentation solaire (photo 12B) ou motorisée sans compter les tuyaux et le réservoir de stockage des eaux. Ces dépenses constituent d'ailleurs une limite chez beaucoup de paysans qui jugent cette méthode comme une bonne stratégie. Un petit nombre de paysans (6,1%) mettent en avant le stockage de l'eau de pluie dans des réservoirs (photo 12C). Cette stratégie d'adaptation est uniquement perçue chez les maraichers. Pendant l'hivernage, ils ouvrent les couvercles des réservoirs afin la pluie les remplissent. Après remplissage, les réservoirs sont fermés et l'eau est utilisée au cœur de la saison sèche pour arroser les jardins maraichers. Par contre, certains paysans développent une alternance des modes d'arrosage pour mieux garantir la disponibilité de l'eau pour leur activité. En effet, certains agriculteurs dotés de moyens financiers et matériels relativement suffisants ont opté pour l'irrigation de l'eau du puits en début de saison sèche avec l'arrosage par aspersion. Vers la fin de cette période où la ressource en eau devient de plus en plus rare, ils mettent en place la technique d'arrosage dite goutte à goutte (photo 12D) qui économise beaucoup plus l'eau.

D'autres stratégies sont également développées en relation avec le système de production. Il s'agit notamment de l'utilisation des variétés à cycle court (selon 73,6% des paysans interrogés) l'échantillon) et l'augmentation des fertilisants (19,6% de l'échantillon).



**Photo 12 :** Quelques stratégies de riposte agricole contre la baisse des ressources en eau  
(Cliché SENE, février 2021)

## 2.2. Les stratégies d'adaptation pastorales

De même que les agriculteurs, les pasteurs ont également mis en œuvre des méthodes d'atténuation des effets de la diminution des ressources hydriques. Le tarissement précoce et la mauvaise qualité des eaux de surface en saison sèche ont poussé les éleveurs à abreuver les animaux au puits ou au forage (photo 13A). Cependant, cette stratégie comporte des limites dans la mesure où l'abreuvement au forage coûte cher pour certains éleveurs et le puisage est parfois très difficile que les éleveurs ont recours à l'âne à cause de la baisse du niveau de la nappe. D'autres éleveurs sont amenés à pratiquer un nouveau type d'élevage (49,5% de l'échantillon). Cette stratégie s'observe différemment chez les éleveurs. Par exemple, certains éleveurs de ruminants qui jadis amenaient leurs bêtes dans la forêt pour s'abreuver ont laissé ce procédé en rade à cause de la dégradation de la qualité des eaux de surface mais également des vols. De nos jours, les bêtes sont élevées dans des enclos ou des maisons à l'intérieur du village (photo 13B). L'élevage se fait de plus en plus à proximité du village. Cependant, cette stratégie impose des dépenses financières en matière d'abreuvement et de nourriture. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle certains éleveurs limitent les effectifs et optent pour l'élevage des races. De plus, nous remarquons de plus en plus l'élevage de poulets de chairs destinés essentiellement à la vente avec l'apparition des fermes avicoles (photo 13C). Ainsi, l'aviculture moderne se renforce davantage au détriment de « l'aviculture villageoise ».



**Photo 13 :** Stratégies de lutte pastorales contre la baisse des ressources en eau (Cliché SENE, février 2021)

### **2.3. Les stratégies d'adaptation des pêcheurs**

La pêche est l'activité la plus impactée par la baisse des ressources en eau. Ainsi, parmi les personnes ayant eu à la pratiquer, 89,7% se sont reconverties. Cette reconversion est liée à la rareté des poissons induits par la diminution des eaux du Niaoulé. Cette baisse, se traduisant par une chute importante de la qualité et des volumes d'eau ainsi que le tarissement précoce, n'offre plus un cadre propice à la respiration, la croissance et la reproduction des poissons. Ainsi, les anciens pêcheurs se sont plus tournés vers l'agriculture, le commerce ou l'élevage qu'ils jugent plus rentables. Le faible nombre de pêcheurs (04) qui reste ne peuvent plus pêcher n'importe comment. Ils ont songé à changer de procédés (6,9%). Autrefois, il y avait plusieurs méthodes mises à disposition pour attraper des poissons. Les pêcheurs pouvaient utiliser la canne, des feuilles tissées, des filets, etc. Par contre, les entretiens nous ont révélé qu'une seule méthode est mise en œuvre par les pêcheurs. Cette méthode varie en fonction des saisons. Pour la saison pluviale, où il y a beaucoup d'eau, les pêcheurs implantent des piquets auxquels ils accrochent le filet. Les filets sont retirés chaque soir et les poissons capturés sont récupérés avant de remettre les filets le matin. Cette stratégie a des limites car parfois les prises sont nulles, mais avec la rareté des poissons ils sont obligés de procéder ainsi. Pendant la saison sèche, où le cours d'eau diminue en volume, les pêcheurs creusent de grands trous qui serviront de pièges pour les poissons et de temps en temps ils passent pour vérifier les captures.

#### **Conclusion partielle**

Le déficit pluviométrique et la hausse de la température, de l'insolation et par conséquent de l'évaporation ont occasionné la diminution des ressources en eau du bassin. Nonobstant le retour de la pluviométrie vers la normale à partir des années 2000, le bassin du Niaoulé continue à subir les conséquences de la péjoration climatique à partir des années 1970. Cette situation a engendré des effets sur les activités économiques.

L'agriculture est devenue une activité imprévisible dans le bassin à cause de la baisse et de l'irrégularité de la pluviométrie qui occasionnent la chute de certaines spéculations très exigeantes en besoin d'eau ainsi que la défaillance du système de production. L'élevage a également subi les incidences de la diminution des ressources en eau qui complique l'abreuvement des animaux et occasionne en partie la réduction du potentiel fourrager. La pêche connaît un déclin progressif à cause de la baisse des volumes et le tarissement précoce des eaux

du Niaoulé qui a occasionné la rareté des poissons et par conséquent, l'abandon de l'activité. Cette baisse est également à l'origine de la dégradation de la ripisylve qui renfermait des arbres fruitiers dont les produits étaient souvent bénéfiques pour les habitants du bassin. Néanmoins, quelques stratégies d'adaptation ont été mises en marche selon l'activité socio-économique afin d'atténuer ces effets. Cependant, les stratégies d'adaptation face à la baisse des ressources en eau du bassin sont souvent limitées par l'insuffisance de moyens techniques et financiers pour la majorité des personnes interrogées.

## Conclusion générale

---

Au terme de notre réflexion, il apparaît clairement que l'évolution des ressources en eau influe sur les activités socio-économiques qui se développent au sein du bassin du Niaoulé.

L'analyse des facteurs stables du bassin du Niaoulé révèle, dans sa globalité, les incidences que peuvent avoir la géologie, le relief, de la pédologie et la végétation sur l'écoulement. La faiblesse de la pente conjuguée à la nature des lithosols sur cuirasse contribue à la réduction de l'écoulement et favorise les pertes d'eau par évaporation. De l'autre côté, le caractère perméable par endroit du bassin favorise l'infiltration qui, à son tour, peut assurer le soutien des étiages lorsqu'elle est importante.

L'évolution de l'écoulement montre une adéquation relativement nette avec celle des paramètres climatiques. Les années d'avant 1975 renferment des modules moyens plus élevés que celles d'après cette date.

L'exploitation des données de SPEI a montré que malgré un retour vers des conditions plus humides dans les dernières années, le bassin du Niaoulé continue à subir les impacts de la sécheresse des années 1970. Cette dernière a intensifié la baisse des ressources en eau de surface et par extension celles souterraines du bassin. Cette baisse des ressources en eau du bassin, occasionnant des effets sur les activités socio-économiques, est d'ailleurs confirmée par la perception populaire.

Le bassin du Niaoulé constitue un espace en pleine croissance avec l'importance des activités socio-économiques qui s'y développent. Cette situation, occasionnée par des potentialités du milieu physique et démographique, laisse entrevoir une diversité d'utilisations des ressources en eau. En revanche, la diminution des ressources en eau du bassin a bouleversé les activités socio-économiques.

L'agriculture est devenue une activité imprévisible dans le bassin à cause de la baisse et de l'irrégularité de la pluviométrie. La baisse de la pluie n'autorise plus les agriculteurs à cultiver des spéculations très exigeantes en besoin d'eau. De plus, le système de production est devenu défectueux à cause de l'irrégularité de la pluviométrie qui perturbe le cycle végétatif des plantes et occasionne du coup une rupture de croissance des spéculations cultivées. L'élevage subit

également les incidences de la diminution des ressources en eau. L'abreuvement est devenu difficile et les zones de pâture deviennent de plus en plus rétrécies. La pêche connaît un déclin progressif à cause de la baisse des volumes et le tarissement précoce des eaux du Niaoulé qui a occasionné la rareté des poissons et par conséquent, l'abandon de l'activité. Cette baisse est également à l'origine de la dégradation de la ripisylve qui renfermait des arbres fruitiers dont les produits étaient souvent bénéfiques pour les habitants du bassin. Néanmoins, quelques stratégies d'adaptation ont été mises en marche selon l'activité socio-économique afin d'atténuer ces effets.

Les stratégies d'adaptation agricole reposent sur l'utilisation des eaux souterraines, le stockage de l'eau de pluie dans des réservoirs, l'alternance des modes d'arrosage ainsi que l'utilisation des variétés à cycle court et l'augmentation des fertilisants. Sur le plan pastoral, l'abreuvement des animaux au puits ou au forage et la modification du type d'élevage (élevage de plus en plus intensif, système de raçage) sont privilégiés dans la lutte contre les déficits en eau. Plusieurs pêcheurs se sont reconvertis et les procédés de capture des poissons sont modifiés. Cependant, les stratégies d'adaptation face à la baisse des ressources en eau du bassin comportent des limites dont les principales relèvent d'une insuffisance de moyens techniques et financiers.

Les incidences socio-économiques de la fluctuation des ressources en eau d'un bassin doivent être prises en compte dans la phase de planification des projets de développement de l'espace concerné. D'ailleurs un projet de revitalisation du cours d'eau pourrait être envisagé avec un recreusement du chenal et la mise en place de digues afin de retenir les eaux pluviales pour permettre leur utilisation avec la réalisation d'un dispositif efficace d'irrigation. Cependant, une étude plus accentuée sur la qualité de l'eau avec des analyses microbiologiques faciliterait la tâche aux décideurs car les facteurs de risques sanitaires des points d'eau du bassin pourraient être évalués. Aussi, les impacts des ponts routiers et des dépôts sauvages pourraient également être étudiés afin de comprendre les effets de ces interventions humaines dans le bassin.

## Références bibliographiques

---

Abramowitz M., Stegun I.A., 1965. Handbook of Mathematical Functions, with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. *Dover Publications*, 1046 p.

Adam J.G., 1966. Composition floristique des principaux types phytosociologiques de végétation du Sénégal. *J. W. African Sci. Assoc.* 11 (1-2). pp. 81-97.

Ali A., Lebel T., 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29 (12), pp. 1705-1714.

ANCAR, 2009 : Situation de référence de la communauté rurale de Missirah. 11 p.

Anderson I., Dione O., Jarosewich-Older M., Olivry J., 2005. Le bassin du fleuve Niger, vers une vision pour un développement durable. *Katherine George Golitzen. Banque mondiale. Washington D.C., USA.* 172 p.

ANSD, 2014: Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage de 2013. *Rapport définitif, Edition, Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Dakar (Sénégal).* 418 p.

Aubréville A., 1957. Accord de Yangambi sur la nomenclature des types africains de végétation. *Revue Bois et Forêts des Tropiques.* n°51. pp. 23-27

Beguiría S., Vicente-Serrano S.M., Angulo-Martínez M., 2010. A multiscalar global drought dataset : the SPEIbase, a new 438 gridded product for the analysis of drought variability and impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, n°91, pp. 1351-1356.

Beguiría S., Vicente-Serrano S. M., Reig F., Latorre B., 2014 : Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited : parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, n°34, pp. 3001-3023.

Bâ D.D., Ndiaye P.M, Faye C., 2018. Variabilité pluviométrique et évolution de la sécheresse climatique dans vallée du Fleuve Sénégal. Institut National de la Recherche Scientifique. *Revue Togolaise des Sciences.* 12(1), pp. 1-20.

- Balme M., Galle S., Lebel T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*, 16(1), pp. 1-8.
- Barreto S.P., 1966. Notice explicative des cartes pédologiques du Sénégal au 1/200000<sup>ème</sup>, Feuilles de Tambacounda - Bakel. ORSTOM, Centre de Dakar-Hann. 66p.
- Bodian A., 2014. Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, 8, pp. 297-312.
- Buontempo C., Booth B., Moufouma-Okia W., 2010. Climat sahélien : rétrospective et projections. *Met Office Hadley Centre, Devon*, 20 p.
- Bruno A., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, Bucuresti : *Editura \*H\*G\*A\**. 206 p.
- Camberlin P., Diop M., 2003. Application of daily rainfall principal component analysis to the assessment of rainy season characteristics in Senegal. *Climate Research*, 23. pp. 159-169.
- CCNUCC, 1992. Convention Cadre des Nations Unies sur les Changement Climatiques. *Nations Unies*, 30 p.
- Chamard P.C., Courel M.F., 1999. La forêt sahélienne menacée. *Cahiers Sécheresse*, pp. 11-18.
- Charnay B., 2010. Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de montagne, le cas du bassin versant du Giffre (Haute-Savoie). *Thèse de Doctorat. Université de Savoie*, 504 p.
- Da Lage A., Métalie G., 2005. Dictionnaire de Biogéographie végétale. *Editions CNRS, Paris*, 579 p.
- Descoings B., 1978. Les formations herbeuses dans la classification phytogéographique de Yangambi. *Adansonia, ser. 2*, 18 (2), pp. 243-256.
- Descroix L., 1986. Projet pour la première partie de la monographie hydrologique du bassin du fleuve Gambie : Composantes géographiques et climatiques. *Rapport ORSTOM, Dakar*, 54p.



DGPRES, 2007. Plan d'action de la gestion intégrée des ressources en eau du Sénégal. Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement. GWP. Gouvernement du Canada, 61 p.

DGPRES, PEPAM, 2014. Guide méthodologique pour l'élaboration d'un plan de gestion des eaux. Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement. Performances, 52 p.

Diop M., 1996. À propos de la durée de la saison pluies au Sénégal. *Cahiers Sécheresse*, 7(1), pp. 7-15.

Diop S., Rekacewicz P., 2003. Atlas mondial de l'eau : une pénurie annoncée. *Editions autrement. PNUÉ. Mémorial Caen*. 63 p.

Dione O., 1997. Évolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. *ORSTOM. Paris. TDM*, n°163, 427 p.

Dubreuil P., 1974. Initiation à l'analyse hydrologique (dix exercices suivis des corrigés). *MASSON et C<sup>ie</sup>. ORSTOM. Paris*. 224 p.

Dubreuil P., Guiscafré J., 1970. Planification du réseau hydrométrique minimal. *Paris ORSTOM*, 1970, 47 p.

ENDA et CIAT (Winograd, M.), 2005. Vulnerability and Adaptation Training and Capacity Building Activities and Tools. Climate change capacity development (C3D) Project (Mind, Sri Lanka, ENDA, Senegal and ERC, South Africa with UNITAR), Side Event, COP 11 Conference, December 6, Montreal, Canada. 11 p.

FAO, 2009. Gestion adaptative de l'eau dans bassin du Lac Tchad. Relever les défis actuels et s'adapter aux besoins futurs. World Water Week. Stockholm.

Faye C., Ndiaye A., Mbaye I., 2017. Une évaluation comparative des séquences de sécheresse météorologique par indices, par échelles de temps et par domaines climatiques au Sénégal. *Journal. wat. env. sci.*, pp. 11- 28.

Faye C., Sow A.A., Ndong J.B., 2015. Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo*, pp. 17-35.

Faye C., 2017. Caractéristiques de la Sécheresse au Sénégal : Méthodes d'analyses, Types d'impacts et Modèles de gestion. *Publié aux Editions Universitaires Européennes*, 233 p.

Faye C., 2018a. Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie (bassin continental Guineo-Sénégalais). *Revue Marocaine de Géomorphologie*, 2. pp. 110-127.

Faye C., 2018b0. Analysis of drought trends in Senegalese coastal zone on different climatic domains (1951-2010). *Anallele Uniiversiitătii diin Oradea, Seria Geografie XXVIII*, (2//2018). pp. 231-244.

Faye C., 2013. Évaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé. *Thèse de Doctorat de l'Université Cheikh Anta DIOP*, 312 p.

Favrot J.C., Vizier J.F., 1998. Les sols à caractère hydromorphe. *7<sup>ème</sup> version modifiée par D. Baize*. 8 p.

Frécaut R., 1982. Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviale. *Tome 1. Université Nancy*, 147 p.

Frécaut R., Pagné P., 1983. Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. *Masson. Paris*. 240 p.

Folland C.K., Karl T.R., 2001. Observed Climate Variability and Change. pp 101-181.

Gravelius H., 1914 : Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, Vol. I. Rivers, in German). Goschen, Berlin, Germany.

GIEC, 2014. Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

GIWA, 2004. Bassin du Lac Tchad. GIWA Regional assessment reports 43.

Gueye M., Sivakumar M. V. K, 1992. Analyse de la longueur de a saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Sénégal. *Compte rendu des travaux n°2. ISRIC library*. 17 p.

Gueye S., 2000. Étude sur les ressources forestières et les plantations forestières du Sénégal période : 1992- 99. *Rapport des résultats du Programme de partenariat CE-FAO (1998-2002)*. 61 p.

Goula B.T.A., Savane I., Konan B., Fadika V., Kouadio G.B., 2005. Comparative study of climatic variability impact on water resources of N'zo and N'zi watersheds in Côte d'Ivoire. *Sciences & Nature*. pp. 10-19.

Humbert J., 1990. Intérêt de la densité de drainage pour régionaliser les données hydrologiques en zone montagneuse. *Hydrology in Mountainous Regions. I- Hydmlological Measurements ; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia, August1990). IAHS Publ.*, no.193. 8p.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. Climate change 2013: The physical science basis. In T. F. Stocker et al. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1535 p.

Khouma, 2000. Les grands types de sols du Sénégal. Rapport FAO sur la quatorzième Réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres. *Abomey, Bénin*. pp. 77-94.

Kettab A., Mitiche R., Bennaçar N., 2008. De l'eau pour un développement durable : enjeux et stratégies. *Revue des Sciences de l'Eau*. 21(2), 11p.

Konate L., 1998. Les Bas- fonds dans le réseau hydrographique du fleuve Gambie : (Cartographie, Régime hydrologique, Valorisation agricole et Typologie). *Thèse de Doctorat de l'Université Cheikh Anta DIOP*, 183 p.

Labou A., 1996. Les disponibilités en eau dans le Sud-est du Sénégal. *Mémoire de maîtrise de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP* 128 p.

Lamb P. J., 1982. Persistence of Subsaharan drought. *Nature*, 299, pp. 46-47.

Le Petit Larousse illustré, 2007. Dictionnaire et encyclopédie. *éd. Française*. 1952 p.

- Leprun J.C., 1979. Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche : genèse- transformations – dégradation. *Thèse. Université Louis Pasteur de Strasbourg. Institut de Géologie.* 255 p.
- Leroux M., 1980. Le climat de l'Afrique tropicale. *Thèse d'État. Université de Dijon. Tome 1.* 605 p.
- Leroux M., 2000. La dynamique du temps et du climat. *Edition Masson.* 367 p.
- Mahé G., Bamba F., Orange D., Fofana L., Kuper M., Marieu B., Soumaguel A., Cissé N., 2000 : Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (Mali). *Paris (FRA), Bamako : IRD ; CNRST*, pp. 179-195.
- Mahé G., Olivry J.C., 1995. Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6(1), pp. 109-117.
- Maignien R., 1965. Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/1000000<sup>ème</sup>. *ORSTOM. Centre de Dakar-Hann.* 71 p.
- Magrin G., Montclos M-A.P., 2018. Crise et développement : La région du lac Tchad à l'épreuve de Boko Haram. Agence Française de Développement. *Paris cedex 12.* 294 p.
- Margat J., 1994. Les ressources en eau : conception, évaluation, cartographie, comptabilité. *Édition BRGM*, 144 p.
- Margat J., H. Cottez, 1995. Usage de l'eau. Contribution dans le Dictionnaire des Sciences Hydrologiques. Commission de terminologie, Comité National Français des Sciences Hydrologiques. <https://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICUSAGE.HTM>, consulté le 06 avril 2021.
- Michel P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Étude géomorphologique. *Tome 1, Tome 2, Tome 3. ORSTOM, Dakar.* 752 p.
- Musy A., Higy C., 2004. Hydrologie, une science de la nature. Gérer l'environnement. *Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.* 314 p.
- Niang A., 1998. Suivi de l'environnement et gestion qualitative des eaux du lac de Guiers. *Thèse de Doctorat de l'Université Cheikh Anta DIOP*, 342 p.

Niasse M., Afouda A., Amani A., 2004. Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. UICN. Gland (Suisse) et Cambridge (Royaume Uni), 71 p.

Office Internationale de l'Eau, 2019. Glossaire eaux, milieux marins et biodiversité. France. 324p.

Olivry J.C., 1983. Evolution des données hydrologique et météorologique disponible sur le bassin du fleuve Gambie. *Rapport préliminaire OMVG, Banjul*. 91p.

OMM. 2012. Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. *Temps-Climat-Eau, OMM-N°1090*, 25p.

OMM. 2012. Guide des pratiques hydrologiques, Hydrologie - de la mesure à l'information hydrologique. *Organisation Météorologique Mondiale*, 1(168), 322 p.

Orange D., Wesselink A. J., Mahé G., Feizoure C. T., 1997. The effects of climate changes on river base flow and aquifer storage in Central Africa. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. *Proceedings of Rabat Symposium*, pp. 113-123.

Ouoba A.P., 2013. Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè. *Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou*, 305 p.

Ozer P., Hountondji Y.C., Laminou Manzo O., 2009. Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'Est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop, Revue de Géographie et d'Écologie Tropicale*, 33, pp. 11-30.

Pardé M., 1968. Fleuves et rivières. *Paris, A. Colin*. 245 p.

Pélissier P., 1973. Les paysans du Sénégal : les civilisations agraires du Cayor à la Casamance. *Saint-Yrieix. Imprimerie Fabrègue*, 939 p.

Roche M., 1963. Hydrologie de surface. *Gauthier-Villars et ORSTROM, Paris, France*, 431 p.

Rodier J., 1963. Irrégularité temporaire des cours d'eau et les facteurs qui la conditionnent. *Extrait de la publication no. 63 de l'A.I.H.S., Symposium Eaux de Surface*. pp. 207-213.

Rossi A., 2010. Analyse spatio-temporelle de la variabilité hydrologique du bassin versant du Mississippi : rôle des fluctuations climatiques et déduction de l'impact des modifications du milieu physique. *Thèse de doctorat. Université de Rouen*, 333 p.

Sagna P., 2005. Dynamique du climat et son évolution récente dans la partie Ouest de l'Afrique Occidentale. *Thèse de doctorat d'Etat de l'Université Cheikh Anta DIOP*. Tome 1. 277 p.

Sagna P., 2008. L'évolution du climat au Sénégal. Forum régional sur les changements climatiques en Afrique de l'Ouest. Dakar

Sané T. 2003. La variabilité climatique et ses conséquences sur l'environnement et les activités humaines en Haute-Casamance. *Thèse de Doctorat de l'Université Cheikh Anta DIOP*, 367 p.

Servat E., Paturel J.E., Lubes-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., Marieu B., 1999. Les différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12, pp. 363-387.

Shanahan T., Overpeck J., Anchukaitis K., Beck J., Scholz C., King J., 2009. Forçage Atlantique et sécheresse persistante en Afrique de l'Ouest. *Science*, 324, pp. 377-380.

Shreve R. L., 1966. Statistical law of stream numbers. *Journal of Geology*, 74, pp. 17-37.

Sighomnou D., 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et Hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. *Thèse Doctorat d'État, Université de Yaoundé 1, Département des Sciences de la Terre*, 291 p.

Solly B., 2021. Dynamique des formations forestières de la Haute-Casamance (Sénégal) de 1965 à 2018, incidences sur les activités agro-sylvo-pastorales et stratégies d'adaptation. *Thèse de Doctorat de l'Université Assane SECK de Ziguinchor*, 279 p.

Soro G.E., Anouman D. G.L., Goula BI T.A., Srohorou B., Savane I., 2014. Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique a diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême Nord-ouest de la cote d'ivoire. *Larhyss/Journal*, 18, pp.107-124.

Sougou A., 1996. Les sécheresses climatiques et les étiages fluviaux au sud-est du Sénégal oriental. *Mémoire de Maîtrise de l'Université Cheikh Anta DIOP*, 151 p.

Sow A.A., 2006. Le Niaoulé et son bassin versant : étude hydrologique. *Anale de géographie, Thèse de Doctorat de l'Université Cheikh Anta DIOP*, 26 p.

Sow A.A., 2007. 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'État es Lettres et Sciences Humaines. UCAD*. 1232 p.

Sivakumar M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric. For. Meteorol.*, 42, pp. 295-305.

Strahler A., 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, pp. 913-920.

Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J. I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming : The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of climate*, 23, pp. 1696-1718.

Vocabulaire de l'hydrologie et de la météorologie, 1978. Conseil international de langue française. La Maison du dictionnaire – CILF. 246 p.

Thibault S., 1997. Bassin versant. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Lavoisier. Technique et documentation. 12 p.

Ward R. C., Robinson M., 1975. Principles of hydrology. *McGraw-Hill, New York, USA*. 450 p.

WMO, UNESCO 2012. Glossaire international d'hydrologie. *World Meteorological Organization*, 385, 469 p.

Xing L., Binbin H., Xingwen Q., Zhanmang L. and Xiaojing B., 2015. Use of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to Characterize the Drying Trend in Southwest China from 1982–2012. *Remote Sens*7, pp.10917-10937.

Yeh P. J.-F., Wu C., 2018. Recent acceleration of the terrestrial hydrologic cycle in the U.S. Midwest. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 123. pp. 1-16.

## Webographie

---

<http://horizon.documentation.ird.fr/>

<http://www.unep.org/dewa/giwa/publications/>

<http://www.hypergeo.eu/>

<http://bibnum.ucad.sn>

<http://journals.openedition.org>

<http://www.hydrologie.org>

<http://www.futura-sciences.com>

<http://www.revues.org>

<http://www.cnrtl.fr>

<http://www.memoireonline.com>

<http://www.geoconfluences.ens-lyon.fr>

<https://www.memoireonline.com>



## **ANNEXES**

---

Annexe 1 : Liste des cartes, des figures, des tableaux et des photos

Annexe 1 : Les planches photographiques

Annexe 2 : Le questionnaire

Annexe 3 : Les guides d'entretien

## Annexe 1 : Liste des cartes, des figures, des tableaux et des photos

---

### Liste des cartes

<b>Carte 1:</b> Carte de localisation du bassin du Niaoulé .....	2
<b>Carte 4:</b> Localités enquêtées dans la commune de Missirah.....	20
<b>Carte 5:</b> Classification du Niaoulé par la méthode de Strahler .....	23
<b>Carte 6 :</b> Plages d'altitudes du bassin versant du Niaoulé .....	25
<b>Carte 7:</b> Carte des sols du bassin.....	32
<b>Carte 8:</b> Les formations végétales dans le bassin du Niaoulé .....	34
<b>Carte 9:</b> La zone du bassin du Niaoulé .....	85
<b>Carte 10:</b> Paysage agraire à Missirah en 2021 .....	88

### Liste des figures

<b>Figure 1 :</b> Courbe hypsométrique du bassin du Niaoulé .....	26
<b>Figure 2 :</b> Évolution moyenne mensuelle de la pluie à la station de Tambacounda (1951-2020) .....	40
<b>Figure 3 :</b> Test de Pettitt appliqué à la série pluviométrique annuelle de la station de Tambacounda (1951-2020) .....	41
<b>Figure 4 :</b> Évolution interannuelle de la pluviométrie à la station de Tambacounda (1951-2020) selon les ISP .....	43
<b>Figure 5 :</b> Fréquences et directions de vents à la station de Tambacounda entre 1980 et 2020 .....	45
<b>Figure 6 :</b> Évolution de l'insolation moyenne mensuelle à la station de Tambacounda (1960- 2020).....	46
<b>Figure 7 :</b> Évolution des températures moyennes mensuelles à la station de Tambacounda (1960-2020).....	47
<b>Figure 8 :</b> Évolution moyenne mensuelle de l'évaporation à la station de Tambacounda entre 1960 et 2020 .....	48
<b>Figure 9 :</b> Évolution de l'humidité relative à la station de Tambacounda entre 1960 et 2020	49
<b>Figure 10 :</b> Evolution combinée des éléments du climat à la station de Tambacounda (1960- 2020).....	50
<b>Figure 11 :</b> Evolution comparée des CMD et DMM à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986) .....	55
<b>Figure 12 :</b> Évolution moyenne mensuelle des débits et de la pluviométrie dans le bassin du Niaoulé entre 1971 et 1986 .....	56
<b>Figure 13 :</b> Évolution des débits moyens journaliers à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986) .....	56
<b>Figure 14 :</b> Évolution de l'hydraulicité à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986).....	61
<b>Figure 15 :</b> Débits moyens annuels à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986).....	62
<b>Figure 16 :</b> Évolution moyenne mensuelle des années extrêmes à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986).....	63

<b>Figure 17</b> : Évolution interannuelle des Dmax à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986) ..	65
<b>Figure 18</b> : Evolution des Dmax en années extrêmes à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986) .....	67
<b>Figure 19</b> : Évolution annuelle de la lame et du volume d'eau écoulée dans le bassin du Niaoulé (1971-1986).....	73
<b>Figure 20</b> : Évolution de la lame d'eau précipitée (Pmm) et celle écoulée (Qmm) dans le bassin du Niaoulé (1971-1986) .....	75
<b>Figure 21</b> : Évolution fréquentielle des catégories de sécheresse avec le SPEI dans le bassin du Niaoulé (1950-2019) .....	79
<b>Figure 22</b> : Evolution temporelle des valeurs de SPEI dans le bassin du Niaoulé (1950-2019) .....	80
<b>Figure 23</b> : Appartenance ethnique des personnes interrogées (Source : Résultats d'enquêtes, 2021).....	86
<b>Figure 24</b> : Distribution des activités socio-économiques selon les localités (Source: Résultats d'enquêtes, 2021) .....	87
<b>Figure 25</b> : Les principales spéculations cultivées dans le bassin du Niaoulé (source : résultats d'enquête, 2021).....	89
<b>Figure 26</b> : Utilisations des eaux de surface dans le bassin du Niaoulé (source : résultats d'enquêtes, 2021) .....	94
<b>Figure 27</b> : Utilisations des eaux souterraines dans le bassin du Niaoulé (source : résultats d'enquêtes, 2021) .....	99
<b>Figure 28</b> : Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur l'agriculture dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021) .....	103
<b>Figure 29</b> : Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur l'agriculture dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021) .....	104
<b>Figure 30</b> : Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur l'élevage dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021) .....	107
<b>Figure 31</b> : Perception des effets de l'évolution des ressources en eau sur la pêche dans le bassin du Niaoulé (Source : résultats d'enquête, 2021) .....	111

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Nombre de ménages à interroger pour chaque localité.....	19
<b>Tableau 2</b> : Longueur des talwegs du réseau hydrographique du Niaoulé .....	24
<b>Tableau 3</b> : Répartition de la superficie selon les tranches d'altitude dans le bassin du Niaoulé .....	26
<b>Tableau 4</b> : Formule de calculs des paramètres avec le rectangle équivalent.....	27
<b>Tableau 5</b> : Paramètres morphométriques du bassin versant du Niaoulé .....	28
<b>Tableau 6</b> : Proportion des principaux types de sols répertoriés dans le bassin du Niaoulé....	33
<b>Tableau 7</b> : Situation et caractéristiques du domaine climatique à la station de Tambacounda .....	38
<b>Tableau 8</b> : Caractéristiques de la pluie moyenne à la station de Tambacounda (1951-2020)	39
<b>Tableau 9</b> : Résultats du test d'homogénéité de la pluviométrie à la station de Tambacounda (1951-2020).....	41

<b>Tableau 10</b> : Déficit pluviométrique à la station de Tambacounda suivant le test de Pettitt (1951-2020).....	42
<b>Tableau 11</b> : Données moyennes mensuelles et totales annuelles de quelques éléments du climat à la station de Tambacounda (1960-2020) .....	44
<b>Tableau 12</b> : Vitesses moyennes mensuelles du vent à Tambacounda entre 1980 et 2020 ....	45
<b>Tableau 13</b> : Périodes de hautes et de basses eaux en fonction du coefficient mensuel de débit CMD (1971-1986).....	53
<b>Tableau 14</b> : Evolution des débits moyens mensuels (DMM) et des CMD à Niaoulé (1971-1986).....	54
<b>Tableau 15</b> : Caractéristiques de la courbe de montée à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986).....	57
<b>Tableau 16</b> : Caractéristiques de la courbe de descente à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986).....	57
<b>Tableau 17</b> : Caractéristiques de la courbe de descente à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986).....	58
<b>Tableau 18</b> : Caractéristiques de l'écoulement moyen mensuel à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986).....	59
<b>Tableau 19</b> : Hydraulicité en pourcentage à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986).....	60
<b>Tableau 20</b> : Débits moyens mensuels (m <sup>3</sup> /s) des années extrêmes à la station de Niaoulé-Tanou (1971 – 1986).....	62
<b>Tableau 21</b> : Fréquences d'apparition des crues (Dmax) à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986).....	64
<b>Tableau 22</b> : Caractéristiques de la variabilité interannuelle des DMAX à la station de Niaoulé-Tanou (1971-1986).....	65
<b>Tableau 23</b> : Fréquences d'apparition des étiages par décade à la station de Niaoulé Tanou (1971 – 1986) .....	67
<b>Tableau 24</b> : Fréquences des dates de début et de fin du tarissement à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986).....	69
<b>Tableau 25</b> : Caractéristiques du bilan moyen annuel dans le bassin du Niaoulé entre 1971 et 1986.....	72
<b>Tableau 26</b> : Caractéristiques du bilan hydrologiques en années extrêmes à la station de Niaoulé Tanou (1971-1986).....	74
<b>Tableau 27</b> : Résultats du test de tendance de Mann-Kendall appliqué au bassin du Niaoulé (1971-1986).....	76
<b>Tableau 28</b> : Catégorisation du degré de sécheresse / d'humidité en fonction des SPEI .....	78
<b>Tableau 29</b> : Tendance des séries de SPEI dans le bassin du Niaoulé (1950 - 2019).....	81
<b>Tableau 30</b> : Valeurs moyennes des SPEI réparties en décennies de 1950 à 2019 sur le bassin du Niaoulé .....	81
<b>Tableau 31</b> : Répartition de la population de la zone du bassin du Niaoulé.....	85
<b>Tableau 32</b> : Effectifs des espèces élevés dans la commune de Missirah .....	90
<b>Tableau 33</b> : Production agricole de la communauté rurale de Missirah entre 2008 et 2009.	91

<b>Tableau 34</b> : Fréquence des réponses expliquant la baisse des eaux de surface dans le bassin du Niaoulé .....	92
<b>Tableau 35</b> : Constats sur l'évolution des eaux de surface par localité dans le bassin du Niaoulé en pourcentage.....	93
<b>Tableau 36</b> : Croisement des réponses concernant le changement des points d'eau et la période .....	95
<b>Tableau 37</b> : Appréciation de la qualité des eaux de surface par rapport au passé.....	95
<b>Tableau 38</b> : Approvisionnement en eau souterraine dans le bassin du Niaoulé.....	97
<b>Tableau 39</b> : Fréquence des réponses expliquant la baisse des eaux de surface dans le bassin du Niaoulé .....	98

### Liste des photos

<b>Photo 1</b> : Troupeau de vaches à Hamdallaye Pont (A) et Troupeau de moutons à Saby Moulessy (B) (Cliché SENE, février 2021).....	90
<b>Photo 2</b> : Poissons pêchés entre Niaoulé Tanou et Gouloumbou (Cliché SENE, février 2021) .....	91
<b>Photo 3</b> : Le Niaoulé en amont du pont (A), le pont de Niaoulé Tanou (B), et le Niaoulé en aval du pont (C) (Cliché SENE, février 2021).....	93
<b>Photo 4</b> : Présence de nénuphars dans les eaux du Niaoulé en saison sèche (Cliché SENE, février 2021).....	96
<b>Photo 5</b> : Tas d'ordures sur le réseau hydrographique du Niaoulé en saison sèche (cliché SENE, février 2021).....	96
<b>Photo 6</b> : Usages domestiques des eaux souterraines dans le bassin du Niaoulé (Cliché SENE, 2021).....	99
<b>Photo 7</b> : Abreuvement d'un cheval au	
<b>Photo 8</b> : Abreuvoir alimenté par le	
100	
<b>Photo 9</b> : Méthode d'exploitation des eaux souterraines pour le maraîchage dans le bassin du Niaoulé (Cliché SENE, février 2021) .....	101
<b>Photo 10</b> : Puisage à l'âne destiné à l'abreuvement des vaches à Saby Moulessy (Cliché SENE, février 2021).....	108
<b>Photo 11</b> : Puits sec abandonné en saison sèche respectivement dans les villages de Hamdallaye Tessang (A), Missirah (B) et Niaoulé Mbaygou (C) (Cliché SENE, février 2021).....	109
<b>Photo 12</b> : Quelques stratégies de riposte agricole contre la baisse des ressources en eau (Cliché SENE, février 2021).....	114
<b>Photo 13</b> : Stratégies de lutte pastorales contre la baisse des ressources en eau (Cliché SENE, février 2021).....	114

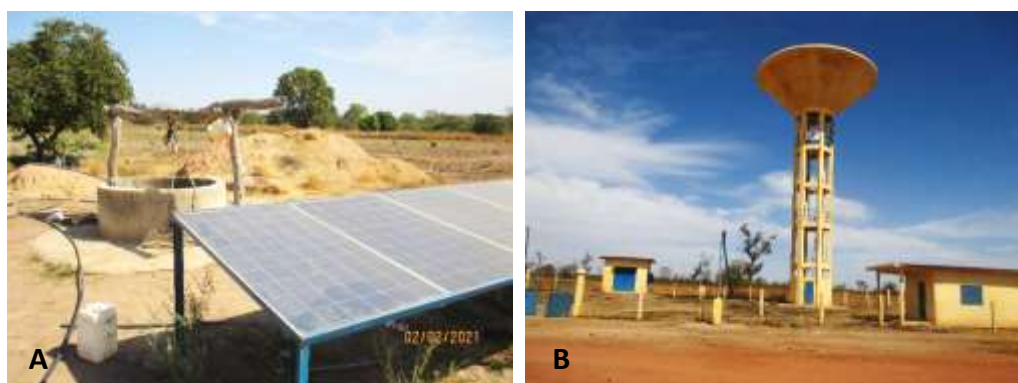
## Annexe 2 : Autres photos de terrain



**Photo 1 :** Plantation de gombo dans un champ à Missirah (A), Champ destiné à la riziculture pluviale localisé dans le village de Hamdallaye Pont (B), et Plantation de salade dans un jardin maraicher à Touba



**Photo 2 :** Coton récolté puit stockée dans une maison à Taliboulou Finaké



**Photo 3 :** Exploitation des eaux souterraines à l'aide d'une pompe alimenté par des kits solaires (A) et Forage de Hamdallaye Pont réalisé à l'aide du PUDC en 2014 (B)



**Photo 4 :** Elevage de vache à proximité du village de Hamdallaye Pont (A) et Elevage de mouton de race dans une ferme à Missirah (B)



**Photo 5 :** La végétation dans le bassin du Niaoulé

## Annexe 3 : Le questionnaire

**Dynamique des ressources en eau et impacts sur les activités socio-économiques : cas du bassin versant**

**1. N°**

**2. Nom de la localité**

1. Hamdallaye pont     2. Hamdallaye Tessang  
 3. Madialy                 4. Niaoulé Mbaygou  
 5. Niaoulé Tanou         6. Touba  
 7. Missirah                 8. Taliboulou Finanké  
 9. Saby Moulessy

**I. Identification de l'enquête**

**3. Prénom et nom**

**4. Age**

1. 40-50     2. 50-60     3. 60-70     4. +70

**5. Ethnie\***

1. Bambara     2. Peulh     3. Soninké  
 4. Diakhanké     5. Autre

\*Aller à "Autre" si l'éthnie n'est pas dans la liste.

**6. Autre**

**7. Fonction**

1. Agriculteur     2. Eleveur     3. Pêcheur  
 4. Commerçant     5. Autre

\*Aller à "Autre" si la fonction n'est pas dans la liste.

**8. Autre1**

**2.1. Pluviométrie**

**9. Constatez-vous la diminution des pluies par rapport au passé?**

1. Oui     2. Non

**10. Si oui, quand?**

1. Avant 1975     2. Entre 1975 et 1995     3. Après 1995

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**11. Comment jugez-vous la saison pluvieuse?**

1. Faiblesse des quantités  
 2. Installation tardive  
 3. Raccourcissement des jours de pluies  
 4. Arrêt précoce  
 5. Diminution du nombre de mois pluvieux  
 6. Autre

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**12. Autre2**

**2.2. Les eaux de surface**

**13. Qu'avez-vous constaté par rapport à l'évolution des eaux de surface?**

1. Baisse     2. Augmentation     3. Stabilité

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**14. Si baisse, quand?**

1. Avant 1975     2. Entre 1975 et 1995     3. Après 1995

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**15. Pourquoi?**

1. Baisse de la pluie  
 2. Forte évaporation  
 3. Faiblesse de l'écoulement  
 4. Baisse du volume d'eau  
 5. Tarissement précoce  
 6. Autre

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**16. Autre4**

**17. Si augmentation, quand?**

1. Avant 1975     2. Entre 1975 et 1995     3. Après 1995

**18. Pourquoi?1**

1. Abondance de la pluviométrie  
 2. Augmentation du volume de l'eau  
 3. Présence quasi-permanente de l'eau  
 4. Autre

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**19. Autre3**

**20. Si stabilité, pourquoi?**

**21. Comment jugez-vous la qualité des eaux de surface par rapport au passé?**

1. Plus bonne                         2. Plus mauvaise  
 3. Pas de changement

**2.3. Les eaux souterraines**

**22. Qu'avez-vous constaté par rapport aux eaux souterraines?**

1. Baisse     2. Augmentation     3. Stabilité

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**23. Si baisse, quand?**

1. Avant 1975     2. Entre 1975 et 1995     3. Après 1995

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.

**24. Pourquoi?2**

1. Baisse de la pluie  
 2. Forte évaporation  
 3. Augmentation de la profondeur des puits  
 4. Tarissement des puits  
 5. Autre

\*Aller à "Autre" si la réponse n'est pas dans la liste.



**25. Autre5**

**26. Si augmentation quand?**

1. Avant 1975    2. Entre 1975 et 1995    3. Après 1995

*Eaux potables cochers pluviales caves (2 ou maximum).*

**27. Pourquoi?3**

1. Forte pluviométrie  
 2. Baisse de la profondeur des puits  
 3. Augmentation du niveau de l'eau du puits  
 4. Autre

*Eaux potables cochers pluviales caves.*

**28. Autre6**

**29. Si stabilité, comment?**

**30. Comment appréciez-vous la qualité actuelle des eaux souterraines par rapport au passé?**

1. Plus bonne    2. Plus mauvaise  
 3. Pas de changement

**2.4. Accessibilité et disponibilité**

**31. Quels sont les principaux lieux d'approvisionnement en eau?**

1. Forage    2. Puits    3. Cours d'eau  
 4. Mares temporaires    5. Autre

*Eaux potables cochers pluviales caves.*

**32. Autre7**

**33. Y a-t-il eu un changement des points d'approvisionnement en eau ?**

1. Oui    2. Non

**34. Si oui, quand?**

1. Avant 1975    2. Entre 1975 et 1995    3. Après 1995

**35. Qu'est-ce qui explique ce changement?**

1. Baisse de la quantité des ressources en eau  
 2. Diminution du nombre de points d'eau  
 3. Augmentation de la quantité des ressources en eau  
 4. Hausse du nombre de points d'eau  
 5. Autre

*Eaux potables cochers pluviales caves.*

**36. Autre8**

**37. Comment appréciez-vous la disponibilité des ressources en eau ?**

1. suffisante    2. insuffisante    3. autre

**3.1. Usages**

**38. A quelle fin utilisez-vous les eaux de surface?**

1. Boisson    2. Corvées domestiques  
 3. Elevage    4. Agriculture  
 5. Pêche    6. Industrie  
 7. Loisirs    8. Autre  
 9. Pas d'utilisation

*Eaux potables cochers pluviales caves (2 au maximum).*

**39. Autre9**

**40. A quelle fin utilisez-vous l'eau des nappes?**

1. Boisson    2. Corvées domestiques    3. Elevage  
 4. Agriculture    5. Industrie    6. Loisirs  
 7. Autre

*Eaux potables cochers pluviales caves.*

**41. Autre10**

**42. Quelle est l'utilisation dominante?**

1. Domestique    2. Elevage    3. Agriculture  
 4. Pêche    5. Industrie    6. Loisirs  
 7. Autre

**43. Autre11**

**44. Quels outils utilisez vous pour recueillir l'eau?**

1. Seaux    2. Bassines    3. Motopompe  
 4. Pompe simple    5. Pompe solaire    6. Tuynaux  
 7. Autre

*Eaux potables cochers pluviales caves.*

**45. Autre13**

**3.2. L'agriculture**

**46. Quels types de cultures pratiquez-vous?**

1. Sous pluie    2. Agriculture de décrue  
 3. Marichage    4. Autre

*Eaux potables cochers pluviales caves.*

**47. Autre14**

**48. Quelles sont spéculations que vous cultivez?**

1. Mil    2. Maïs    3. Coton    4. Arachide  
 5. Riz    6. Gombo    7. Salade    8. Piment  
 9. Tomate    10. Autre

*Eaux potables cochers pluviales caves.*

**49. Autre15**

50. Quelle est la superficie des champs que vous cultivez?

1. Moins 1ha  2. 1ha à 5ha  3. 5ha à 10ha  
 4. +10ha

51. Comment appréciez-vous le rôle du Niaoulé sur l'agriculture?

1. Pas d'importance  2. Importance moyenne  
 3. Important

52. Comment jugez-vous l'évolution des ressources en eau pour l'agriculture?

1. Baisse  2. Augmentation  3. Stabilité

53. Quels sont les impacts de cette évolution sur l'agriculture?

1. Baisse des rendements  
 2. Réduction de la surface cultivée  
 3. Baisse de la production de certaines spéculations cultivées  
 4. Réduction de la durée de l'activité  
 5. Baisse de la qualité des produits récoltés  
 6. Défaillance du système de production  
 7. Augmentation des rendements  
 8. Extension de la surface cultivée  
 9. Meilleure qualité des produits récoltés  
 10. Performance du système de production  
 11. Autre

*Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 ou maximum).*

54. Autre17

55. Si abandon de certaines variétés, lesquelles?

### 3.3.L'élevage

56. Quels sont les trois principales catégories d'animaux que vous élevez?

1. Bovin  2. Ovin  3. Caprin  4. Equin  
 5. Volaille  6. Asin

*Vous pouvez cocher plusieurs cases.*

57. Comment appréciez-vous le rôle du Niaoulé sur l'élevage?

1. Faible  2. Moyenne  3. Important

58. Comment jugez-vous l'évolution des ressources en eau sur l'élevage?

1. Baisse  2. Augmentation  3. Stabilité

59. Quels sont les impacts de cette évolution sur l'élevage?

1. Difficulté d'abreuvement du bétail  
 2. Diminution des effectifs  
 3. Hausse des zones de pâture  
 4. Facilité d'abreuvement du bétail  
 5. Augmentation des effectifs  
 6. Baisse des zones de pâture  
 7. Autre

*Vous pouvez cocher plusieurs cases.*

60. Autre20

### 3.4.La pêche

61. Avez-vous pratiqué la pêche sur le Niaoulé?

1. Oui  2. Non

62. Si oui, quand ?

1. Avant 1975  2. Entre 1975 et 1995  3. Après 1995

*Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 ou maximum).*

63. Comment appréciez-vous le rôle du Niaoulé par rapport à l'activité ?

1. Faible  2. Moyenne  3. Important

64. Quelles sont les espèces halieutiques les plus pêchées dans le Niaoulé?

65. Durant quelle période de l'année pratiquez-vous la pêche dans le Niaoulé?

1. Saison sèche chaude  2. Saison sèche froide  
 3. Saison des pluies  4. Toute l'année

*Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 ou maximum).*

66. Comment jugez-vous l'évolution des ressources en eau pour la pêche?

1. Baisse  2. Augmentation  3. Stabilité

67. Quels sont les effets de cette évolution sur la pêche?

1. Rareté des poissons  2. Abandon de l'activité  
 3. Migration des poissons  4. Autre

*Vous pouvez cocher plusieurs cases.*

68. Autre24

69. Si abandon, quand ?

1. Avant 1975  2. Entre 1975 et 1995  3. Après 1995

70. Si migration, actuellement où est-ce qu'on trouve les ressources halieutiques ?

1. Partout  2. Chenal principal  3. Ne sait pas  
 4. Autre

*Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 ou maximum).*

71. Autre12

### 4.1.Agriculture

72. Quelles sont les stratégies développées pour faire face à la dynamique des ressources en eau?

1. Irrigation au puits ou au robinet  
 2. Stockage de l'eau dans des réservoirs  
 3. Utilisation des variétés à cycle court  
 4. Réadaptation  
 5. Augmentation de la quantité de fertilisant  
 6. Autre

*Vous pouvez cocher plusieurs cases.*

<p>73. Autre26  <input type="text"/></p> <p>74. Si utilisation de variétés à cycle court, lesquelles?  <input type="text"/></p> <p>75. Existe-t-il des politiques d'accompagnement de l'agriculture face à la dynamique hydrologique?  <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p> <p>76. Promoteur 1  <input type="text"/></p> <p>77. Date <input type="text"/></p> <p>78. Appréciation1  <input type="text"/></p> <p>79. Que pensez-vous de l'avenir de l'agriculture face à l'évolution des ressources en eau dans le bassin?  <input type="radio"/> 1. Prometteur <input type="radio"/> 2. Incertain <input type="radio"/> 3. Ne sait pas</p>	<p>84. Promoteur  <input type="text"/></p> <p>85. Date1 <input type="text"/></p> <p>86. Appréciation2  <input type="text"/></p> <p>87. Que pensez-vous de l'avenir de l'élevage face à l'évolution des ressources en eau dans le bassin?  <input type="radio"/> 1. Prometteur <input type="radio"/> 2. Incertain <input type="radio"/> 3. Ne sait pas</p>
<p><b>4.2.Elevage</b></p>	
<p>80. Quelles sont les stratégies développées pour faire face à la dynamique des ressources en eau?  <input type="checkbox"/> 1. Abreuvement au puits  <input type="checkbox"/> 2. Stockage de l'eau dans des réservoirs  <input type="checkbox"/> 3. Abreuvement au forage  <input type="checkbox"/> 4. Nouveau type d'élevage  <input type="checkbox"/> 5. Autre  <i>Faites précisez, cocher plusieurs cases.</i></p> <p>81. Autre27  <input type="text"/></p> <p>82. Si nouveau type d'élevage, lequel?  <input type="text"/></p> <p>83. Existe-t-il des politiques d'accompagnement de l'élevage face à la dynamique hydrologique?  <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p>	<p><b>4.3.Pêche</b></p> <p>88. Quelles sont les stratégies développées pour faire face à la dynamique des ressources en eau?,  <input type="checkbox"/> 1. Aménagement de bassins piscicoles  <input type="checkbox"/> 2. Reconversion  <input type="checkbox"/> 3. Changement de procédés  <input type="checkbox"/> 4. Autre  <i>Faites précisez, cocher plusieurs cases.</i></p> <p>89. Si changement de procédé décrivez-le?  <input type="text"/></p> <p>90. Autre28  <input type="text"/></p> <p>91. Existe-t-il des politiques d'accompagnement de la pêche face à la dynamique hydrologique?  <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p> <p>92. Date2 <input type="text"/></p> <p>93. Appréciation3  <input type="text"/></p> <p>94. Que pensez-vous de l'avenir de la pêche face à l'évolution des ressources en eau dans le bassin?  <input type="radio"/> 1. Prometteur <input type="radio"/> 2. Incertain <input type="radio"/> 3. Ne sait pas</p>

## Annexe 4 : Les guides d'entretien

---

### Guide d'entretien destiné aux structures de gestion des ressources en eau

1. Présentation de la structure ?
  2. Quel est la date de création de votre structure ?
  3. Quel est votre domaine d'intervention ?
  4. Quel est l'état de votre connaissance sur les ressources en eau du bassin ?
  5. Recensez-vous des données quantitatives (débits) et qualitatives sur les ressources en eau ?
  6. Si oui, comment ?
  7. Connaissez-vous les différents usagers de l'eau et leurs rôles dans le bassin ?
  8. Si oui, lesquels ?
  9. Prenez-vous en compte les impacts de ces usages dans la gestion du bassin ?
  10. Si oui, comment ?
  11. Avez-vous une fois recensé des données sur ces impacts (des usages) dans le bassin ?
  12. Si Oui, à quelle (s) période (s) ?
  13. Quelles sont les différentes réglementations qui s'appliquent à chaque usage ?
  14. Comment entretenez-vous des rapports avec les autres acteurs de gestion des ressources en eau du bassin ?
  15. Comment entretenez-vous des rapports avec les usagers de l'eau du bassin ?
  16. Votre structure de gestion participe-t-elle ou a-t-elle mis en place un processus de concertation dans le bassin ?
  17. Quel est le nombre d'actions de sensibilisation engagées par votre structure de gestion ?
  18. Expliquez votre mode de gestion et son aptitude à modifier ses pratiques pour tendre vers une gestion intégrée des ressources en eau ?
  19. Quelles sont les limites de la gestion des ressources en eau dans le bassin ?
- Comment évaluez-vous les actions de votre structure et son plan de gestion ?

## Guide d'entretien destiné aux producteurs agricoles

1. Présentation ?
2. Description du système de production agricole ?
3. Moyens de production ?
4. Spécifications cultivées ?
  - Cultures de subsistances ?
  - Cultures commerciales ?
5. Quelles sont les techniques mises en œuvre pour la production ?
  - Techniques traditionnelles ?
  - Techniques modernes ?
6. Quelles sont les facteurs favorables à la production agricole ?
  - Irrigation
  - Disponibilité des terres
  - Faiblesse de l'écoulement
  - Fertilité des terres
  - Abondance de la pluie
  - Augmentation des terres irriguées
7. Quelles sont les contraintes rencontrées par l'agriculture ?
  - Difficultés dans l'irrigation
  - Faiblesse de l'écoulement
  - Faiblesse de la pluie
  - Diminution de l'écoulement
  - Régression des terres irriguées
8. Quelles sont les stratégies mises en œuvre pour faire face à ces contraintes ?
  - Défrichements pour augmenter la superficie et la fertilité des champs
  - Reconversion vers d'autres activités
  - Emigration

## Guide d'entretien destiné aux éleveurs

1. Présentation ?
2. Quel(s) type (s) d'élevage pratiquez-vous (extensif et/ou intensif) ?
3. Quelle est la catégorie dominante (Bovin, ovin, caprin, équin, volaille) ?
4. Quels sont les races élevées ?
5. Quels sont les effectifs pour chaque catégorie ?
6. Comment jugez-vous le rôle du Niaoulé sur l'élevage ?
7. Y a-t-il suffisamment de point d'eau pour l'abreuvement du bétail ?
8. Quels sont les modes d'abreuvement du bétail ?
9. Quels sont les différents problèmes liés à l'eau pour l'élevage ?
  - Assèchement précoce des mares
  - Baisse des nappes (augmentation de la profondeur des puits)
  - Transport de l'eau vers les enclos
  - Faiblesse de l'hydraulique villageoise
  - Absence ou insuffisance de points modernes d'abreuvement
10. Quel est l'état du système de production pastorale ?
  - Production de viande
  - Production laitière (quantité moyenne de litres par vache)
  - Commercialisation
11. Quels sont les apports de l'élevage dans le système économique global de la zone ?
  - Avantages (apports en matière organique dans le système agricole)
  - Inconvénients
12. Comment gérez-vous les ressources en eau pour l'élevage ?
13. Quels sont les solutions envisagée ou envisageable ?

## Guide d'entretien destiné aux pêcheurs

1. Présentation ?
2. Pouvez-vous décrire les techniques de pêche pratiquées dans le bassin ?
3. Quels sont les espèces pêchées ?
4. Quel est la quantité moyenne pêchée par jour ?
5. Comment jugez- vous le rôle du Niaoulé sur la pêche ?
6. Comment appréciez-vous la taille des poissons ?
7. Quels sont les différents problèmes liés à l'activité ?
  - Tariessement précoce du cours d'eau
  - Difficultés de la navigation
  - Rareté des espèces
  - Manque de moyens techniques et financier
8. Comment appréciez-vous l'état actuel de l'activité ?
9. Quels sont les apports de la pêche dans le système économique global de la zone ?
10. Quels sont les stratégies mises en œuvre pour faire face à la dynamique des ressources en eau ?

## Table des matières

Dédicaces .....	ii
Remerciements .....	iii
Sigles et abréviations.....	v
Résumé.....	vi
Abstract .....	vii
Sommaire .....	viii
Introduction .....	1
1. Problématique .....	3
1.1. Contexte.....	3
1.2. Justification.....	4
1.3. Questions de recherche .....	5
1.4. Objectifs de recherche .....	5
1.5. Hypothèses de recherche .....	6
2. Analyse conceptuelle .....	6
2.1. Impacts.....	6
2.2. Ressource en eau .....	7
2.3. Variabilité climatique .....	7
2.4. Dynamique hydrologique .....	8
2.5. Bilan hydrologique .....	9
2.6. Bassin versant.....	9
3. Méthodologie de recherche.....	10
3.1. La recherche bibliographique .....	10
3.2. Etat de l'art.....	10
3.3. Les données climatiques : collecte et traitement .....	15
3.4. Les données hydrométriques : collecte et traitement.....	15
3.5. Les données spatiales : collecte et traitement.....	16
3.6. Les travaux de terrain .....	16
PREMIÈRE PARTIE : CADRE PHYSIQUE DU BASSIN DU NIAOULE .....	21
Chapitre 1 : Le milieu et les facteurs stables de l'écoulement du bassin versant du Niaoulé..	22
I. Le réseau hydrographique.....	22
1.1. La classification du Niaoulé par la méthode de Strahler (1957) .....	22
1.2. La densité de drainage .....	23



II.	Le relief et les caractéristiques morphométriques du bassin.....	24
2.1.	Le relief du bassin.....	24
2.2.	L'hypsométrie du bassin.....	25
2.3.	La forme du bassin .....	27
2.4.	Les indices de pente.....	28
2.4.1.	L'indice de pente global de Dubreuil (Ig).....	28
2.4.2.	L'indice de pente de Roche (Ip).....	28
III.	Les caractéristiques géologiques du bassin.....	29
3.1.	La structure géologique du bassin .....	29
3.2.	La perméabilité du bassin .....	30
IV.	La pédologie et les formations végétales du bassin .....	30
4.1.	Les caractéristiques pédologiques du bassin .....	31
4.1.1.	Les sols ferrugineux tropicaux .....	31
4.1.2.	Les sols minéraux bruts.....	31
4.1.3.	Les sols peu évolués .....	32
4.1.4.	Les sols hydromorphes.....	33
V.	Les formations végétales du bassin .....	33
4.1.	La forêt claire et la savane boisée.....	34
4.2.	La savane arborée .....	35
4.3.	La savane arbustive .....	35
	Conclusion partielle.....	35
	Chapitre 2 : Le climat et sa variabilité dans le bassin du Niaoulé .....	36
I.	Les mécanismes de la circulation générale.....	36
1.1.	Les centres d'action .....	36
1.2.	Les masses d'air.....	36
1.3.	La trace au sol de l'Equateur Météorologique.....	37
II.	Le régime pluviométrique du bassin et sa variabilité.....	38
2.2.	Le régime pluviométrique .....	38
2.2.	La variabilité de la pluie .....	38
2.2.1.	La variabilité mensuelle de la pluie.....	39
2.2.2.	La variabilité annuelle de la pluie .....	41
III.	D'autres éléments du climat.....	44
3.1	Les vents .....	44

3.2.	L'insolation.....	46
3.3.	Les températures.....	46
3.4.	L'évaporation.....	48
3.5.	L'humidité relative .....	49
DEUXIÈME PARTIE : ÉCOULEMENT ET DISPONIBILITÉ EN EAU DU BASSIN VERSANT DU NIAOULE.....		51
Chapitre 3 : Le régime hydrologique et sa variabilité dans le bassin du Niaoulé .....		52
I.	Le régime fluvial dans le bassin du Niaoulé.....	52
1.1.	Le régime moyen .....	54
1.1.1.	La phase de montée des eaux .....	54
1.1.2.	La phase de descente des eaux .....	55
1.2.	La variabilité du régime hydrologique moyen du Niaoulé.....	56
1.2.1.	La variabilité journalière de l'écoulement du Niaoulé.....	56
1.2.2.	La variabilité saisonnière de l'écoulement du Niaoulé .....	59
1.2.3.	La variabilité annuelle de l'écoulement du Niaoulé.....	60
II.	L'analyse des phénomènes extrêmes de l'écoulement.....	63
2.1.	Les crues .....	63
2.1.1.	Les dates d'apparition des crues.....	63
2.1.2.	La variabilité interannuelle des crues .....	64
2.1.3.	Les crues des années extrêmes .....	66
2.2.	Les étiages .....	67
2.3.	Le tarissement.....	68
Chapitre 4 : Bilan hydrologique et disponibilités en eau dans le bassin du Niaoulé .....		71
I.	Le bilan moyen de l'écoulement.....	72
II.	Le bilan hydrologique en années extrêmes .....	73
2.1.	Le bilan en année du débit moyen le plus élevé .....	74
2.2.	Le bilan en année du débit moyen le moins élevé .....	74
III.	Estimation du comportement hydrologique du bassin du Niaoulé .....	75
3.1.	Analyse des tendances de la dynamique hydrologique dans le bassin du Niaoulé ...	75
3.2.	Caractérisation de la sécheresse dans le bassin avec le SPEI de 1950 à 2019 .....	76
Conclusion partielle.....		82
TROISIEME PARTIE : USAGES DE L'EAU ET IMPACTS DE LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES EN EAU SUR LES ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU NIAOULE.....		83

Chapitre 5 : Les ressources en eau et leurs usages dans le bassin du Niaoulé .....	84
I. Les facteurs humains et économiques du bassin.....	84
1.1. La population du bassin.....	84
1.2. Les activités socio-économiques .....	86
1.2.1. L’agriculture.....	87
1.2.2. L’élevage.....	89
1.2.3. La pêche .....	90
1.2.4. Le commerce .....	91
1.2.5. D’autres secteurs d’activités.....	92
II. Les usages de l’eau dans le bassin du Niaoulé.....	92
2.1. Des eaux de surface faiblement utilisées .....	92
2.1.1. Les usages domestiques .....	94
2.1.2. Les usages productifs .....	95
2.1.3. Les usages in situ.....	97
2.2. Des eaux souterraines fortement sollicitées.....	97
2.2.1. Les usages domestiques .....	99
2.2.2. Les usages productifs .....	100
Conclusion partielle.....	101
Chapitre 6 : Les impacts de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio-économiques et les stratégies d’adaptation dans le bassin versant du Niaoulé.....	102
I. Les impacts de la dynamique des ressources en eau sur les activités socio-économiques dans le bassin du Niaoulé .....	102
1.1. L’agriculture, une activité devenue incertaine dans le bassin .....	102
1.1.1. La baisse de la production de certaines spéculations cultivées.....	103
1.1.2. La défaillance du système de production .....	104
1.1.3. D’autres externalités sur l’agriculture .....	105
1.2. Des activités pastorales relativement bouleversées .....	107
1.2.1. La difficulté d’abreuvement du bétail .....	107
1.2.2. La baisse des zones de pâture.....	109
1.3. La pêche, une activité en déclin dans le bassin .....	110
1.3.1. La rareté des poissons .....	111
1.3.2. L’abandon de l’activité.....	112
1.4. Une autre externalité.....	112
II. Les stratégies d’adaptation face à la baisse des ressources en eau du bassin.....	112

2.1. Les stratégies d'adaptation agricoles .....	113
2.2. Les stratégies d'adaptation pastorales .....	114
2.3. Les stratégies d'adaptation des pêcheurs .....	115
Conclusion partielle.....	115
Conclusion générale .....	117
Références bibliographiques .....	119
Webographie .....	128
ANNEXES .....	I
Annexe 1 : Liste des cartes, des figures, des tableaux et des photos.....	II
Liste des cartes .....	II
Liste des figures .....	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des photos.....	V
Annexe 2 : Autres photos de terrain .....	VI
Annexe 3 : Le questionnaire .....	VIII
Annexe 4 : Les guides d'entretien .....	XII