



WEFE SENEGAL

Projet d'Appui à la gestion des ressources en eau et du Nexus eau-énergie-agriculture dans le Bassin du Fleuve Sénégal



Guinée



Mali



Mauritanie



Sénégal



Deliverable 2: Report on model calibration

AGRO-HYDROLOGICAL MODELLING IN THE SENEGAL RIVER BASIN

*Synthèse bibliographique sur les études relatives
à la modélisation agro-hydro-climatique dans le
bassin versant du fleuve Sénégal*

UCAD, Senegal

Authors: Awa NIANG, Abdoulaye FATY and Mbayang THIAM



EUROPEAN COMMISSION
JOINT RESEARCH CENTRE

CONTENU DU RAPPORT

RESUME -----	3
INTRODUCTION -----	4
BREF RAPPEL DE L'HYDRO-GÉOGRAPHIE DU BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL-----	6
SYNTHÈSE DOCUMENTAIRE-----	9
1. ACTUALISATION DE LA MONOGRAPHIE DU FLEUVE SENEGAL -----	9
2. PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS (POGR) -----	10
3. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) -----	11
Phase 1 : État des lieux -----	11
Phase 2 : Établissement des schémas sectoriels -----	13
Phase 3 : Établissement du schéma directeur à l'horizon 2025 -----	16
4. TABLEAU DE BORD DE GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU DU FLEUVE SENEGAL -----	17
5. Allocation optimale de l'eau dans le bassin versant du fleuve Sénégal-----	18
6. Programmes de modélisation et de gestion des ressources des barrages de manantali et Diama -----	19
6.1. Simulation de gestion d'un barrage à objectifs multiples, au pas de temps journalier -----	19
6.2. Projet COREDIAM-----	19
7. Programme d'atténuation et de suivi des impacts sur l'environnement (PASIE) -----	20
8. Phase 2 du projet de Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du fleuve Sénégal	20
9. Impacts du changement climatique -----	21
DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES-----	30
1. RESEAU D'OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES -----	30
2. Situation de référence du réseau d'observations -----	30
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	32
ANNEXES -----	39
Annexe 1 : Base de données climatiques de la République du Sénégal (métadonnées)-----	39
Annexe 2 : Base de données pluviométriques du bassin du fleuve Sénégal (Métadonnées)-----	40
Annexe 3 : Base de données hydrologiques du bassin du fleuve Sénégal (Métadonnées)-----	45
Annexe 4 : Carte des stations pluviométriques du bassin versant du fleuve Sénégal -----	47

Résumé

L'Afrique de l'Ouest, en particulier la zone soudano-sahélienne, a connu une variabilité climatique au cours de ces dernières décennies. Malgré quelques périodes de répit, les statistiques ne plaident pas vraiment en faveur d'un retour à de meilleures conditions climatiques, pluviométriques plus précisément. Au-delà de l'aspect structurel de cette variabilité climatique, de nombreux effets ont été observés sur les activités socio-économiques, en plus de l'implication des pratiques socio-culturelles. Cette situation se répercute de manière dramatique sur les ressources en eau et notamment sur l'hydrologie des bassins transfrontaliers comme celui du Sénégal.

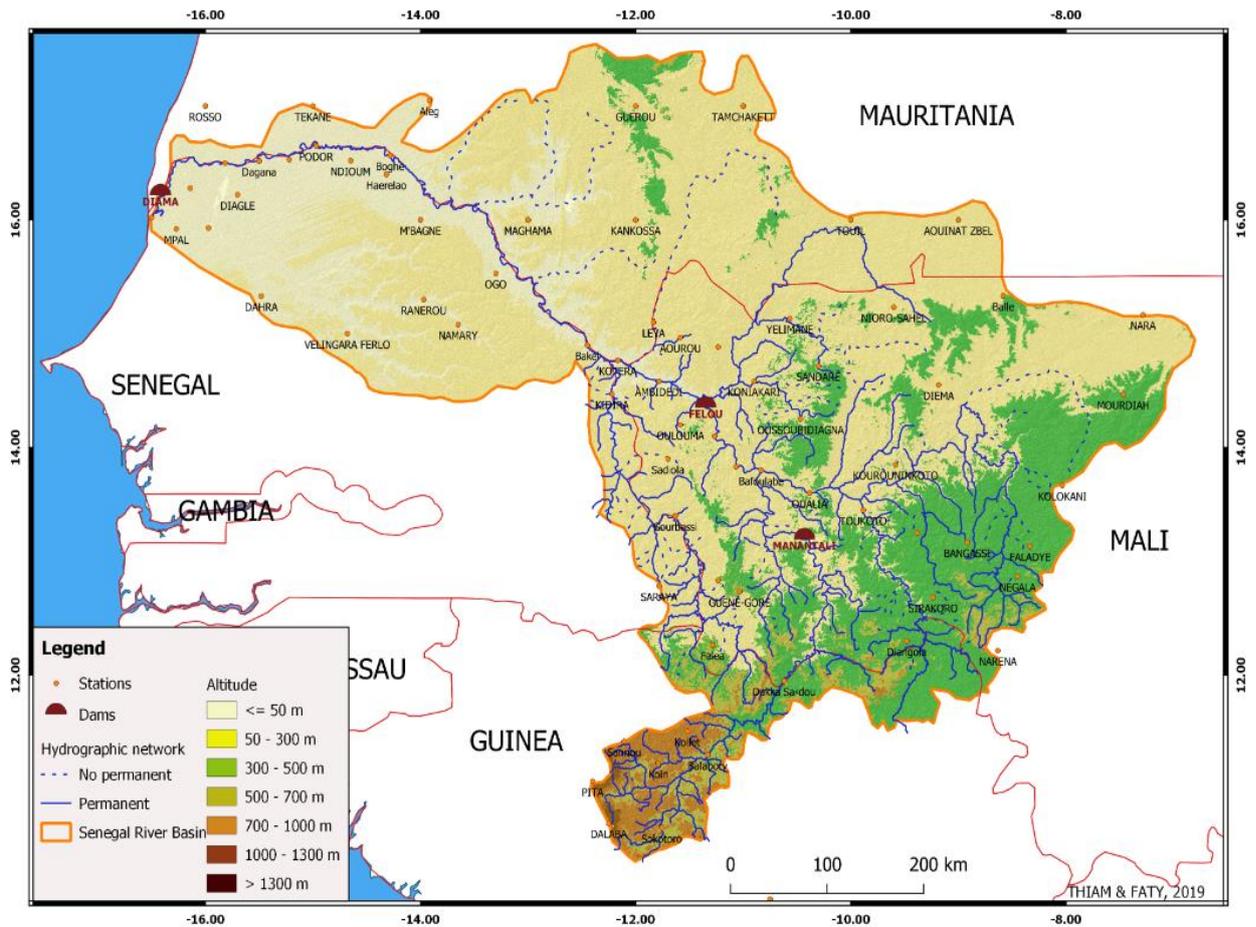
L'objectif général du présent rapport consiste à faire une synthèse bibliographique sur les études relatives à la modélisation agro-hydro-climatique dans le bassin versant du fleuve Sénégal. Il vise à dresser un état des lieux sur toute la documentation disponible, notamment celle de l'OMVS, de l'Institut de Recherche pour le Développement, du projet AMMA-CATCH, de l'UNESCO et autres institutions ; sans oublier les thèses et mémoires de l'UCAD. La synthèse de l'ensemble des sources citées ci-dessus a été réalisée ; elle est essentiellement relative à l'analyse de la variabilité du climat, l'évaluation des risques climatiques, l'impact sur la disponibilité des ressources en eau sans oublier les aspects socio-économiques, en particulier dans le contexte des aménagements et infrastructures hydrauliques nationales ou transfrontalières. Le présent rapport tente également de faire ressortir une analyse des résultats de différents scénarios pour une bonne documentation du Projet "Nexus WEFÉ SENEGAL".

INTRODUCTION

Le présent rapport sur « synthèse bibliographique sur les études relatives à la modélisation agro-hydro-climatique dans le bassin versant du fleuve Sénégal » constitue le deuxième livrable dans le cadre Projet WEFÉ-Senegal. Il a pour objectif principal de faire un état des lieux exhaustif du bassin du fleuve Sénégal et d'appuyer le développement d'un modèle agro-climatique intégrant les dimensions climatique, agronomique, économique et l'occupation du sol dans l'optique de la gestion intégrée des ressources en eau du bassin.

Le rapport d'orientation méthodologique a défini une approche par sous-bassins, conformément à l'hydrographie du bassin du fleuve Sénégal (BFS) et en cohérence avec les études antérieurement réalisées. Ainsi, le BFS sera découpé en sept (07) sous-bassins auxquels il faut rajouter la partie terminale du fleuve Sénégal entre Diama et l'Océan Atlantique. Pour rappel, les sous-unités hydrologiques sont : SB1 : le Bafing amont jusqu'au barrage de Manantali ; SB2 : le Bafing aval, du barrage de Manantali à Bafoulabé, à savoir la confluence avec le Bakoye, dont naît le Sénégal ; SB3 : le Bakoye jusqu'à Bafoulabé, à savoir la confluence avec le Bafing, dont naît le Sénégal ; SB4 : la Falémé jusqu'à la confluence avec le Sénégal ; SB5 : le Sénégal amont de Bafoulabé jusqu'à Bakel ; SB6 : le Sénégal moyen de Bakel à Podor ; SB7 : le Sénégal, de l'aval de Podor jusqu'au barrage de Diama.

Le présent rapport présente l'état de l'art sur les connaissances acquises sur le bassin versant du fleuve Sénégal avec un focus sur les éléments relatifs à la modélisation agro-hydrologique. Cette modélisation est d'autant plus pertinente que les récentes activités de l'OMVS ont mis en exergue la nécessité d'un diagnostic approfondi pour mieux appréhender les modifications actuelles et futures du climat à l'échelle du bassin et de quantifier leurs impacts réels et potentiels sur l'environnement, sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau mais aussi sur les activités socio-économiques des populations riveraines.



Carte 1 : Localisation du bassin du fleuve Sénégal

BREF RAPPEL DE L'HYDRO-GÉOGRAPHIE DU BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL

Le bassin du fleuve Sénégal, deuxième plus grand bassin hydrographique d'Afrique de l'Ouest après le Niger, est situé entre 10° 30' et 17° 30' de latitude nord et de 7° 30' et 16° 30' de longitude ouest. Entièrement situé dans la zone tropicale à longue saison sèche (MICHEL, 1973) et réparti entre les quatre États que sont la Guinée (10% sur les hauts plateaux du Fouta Djallon), le Mali (38%), la Mauritanie (30%), et le Sénégal (22%), le bassin du Sénégal est orienté selon un axe SW-NE et couvre une superficie de 289 000 km². Le fleuve Sénégal, long de 1790 km, naît au sein du massif du Fouta Djallon en République de Guinée. Ses deux principaux affluents sont le Bafing long de 760 km qui prend sa source dans le Fouta-Djallon et amène plus de la moitié du débit total du fleuve Sénégal, et le Bakoye, qui prend sa source sur le plateau mandingue et rejoint le Bafing au bout de 560 km de cours à Bafoulabé.

En aval de Bafoulabé, les principaux affluents du fleuve Sénégal sont, en rive droite, la Kolombiné, le Karakoro et le Gorgol et en rive gauche la Falémé. La Falémé prend sa source dans le Fouta-Djallon, 650 km avant de se jeter dans le fleuve Sénégal à 30 km en amont de Bakel (ROCHETTE, 1974). Le Sénégal se jette dans l'océan Atlantique par une embouchure située au sud de la ville de Saint-Louis du Sénégal.

Du point de vue géologique, le bassin du fleuve Sénégal est situé au sud-ouest du craton sud-ouest africain (ROCCI, 1965 cité par KANE, 1997) ; il est presque entièrement inclus dans le bassin sédimentaire méso-cénozoïque sénégal-mauritanien (200-140 Millions d'années) et dont il a hérité de l'histoire géologique.

Le relief du bassin est très contrasté, en particulier dans le haut bassin et la partie guinéenne où les altitudes dépassent souvent 1000 m (Carte 1). La vallée et le delta sont de vastes zones plates d'altitude partout inférieure à 100 m ; l'estuaire est une zone de subsidence généralement située en dessous du niveau de la mer.

Le bassin comporte une gamme variée de pittoresques paysages allant du sud soudanien au sahélien (SOW, 1984). Au plan climatique, le bassin s'étend du tropical humide au sud avec lus de 1500 mm.an⁻¹ au tropical sec avec 200-300 mm.an⁻¹ dans la partie septentrionale. Cette très forte variabilité climatique détermine également une vulnérabilité croissante du sud vers le nord (OYEBANDE et al, 2006 et 2008 ; KANE et NIANG, 2009).

La population totale du bassin du Sénégal était estimée en 2007 à environ 3,5 millions d'habitants (OMVS/OMM, 2007) dont 85 % vivent à proximité des cours d'eau. D'une économie traditionnelle de culture de décrue et de culture sous pluie, à la faveur des aménagements hydrauliques, on évolue de plus en plus vers des systèmes de cultures irrigués d'abord communautaires et privées de plus en plus.

Le réseau hydrographique, composante essentielle du paysage du bassin, participe à la formation et à la délimitation des grandes zones géographiques, socio-économiques et socioculturelles. Le bassin se subdivise en trois grandes zones hydro-géographiques (Figure 1), fortement différenciées en fonction de la topographie, la géologie, l'hydrographie et le climat : le haut bassin en amont de Kayes ; le bassin inférieur ou vallée alluviale qui s'allonge sur 630

km de Kayes à Dagana, parsemée de hautes levées fluvio-deltaïques ; le delta, situé en aval de Dagana et prolongé par un estuaire à partir duquel le fleuve se jette à la mer par une embouchure unique.

Le haut bassin ou bassin supérieur est la zone où le fleuve reçoit la quasi-totalité de ses apports en eau ; les altitudes y culminent à 1538 m au Mont Loura, dans le massif de Mali en Guinée. A partir de Kayes, le fleuve entre dans le bassin inférieur ; la vallée s'élargit et atteint 10 à 15 km en période de crue. La vallée alluviale se subdivise en haute vallée, de Kayes à Matam ; moyenne vallée, entre Matam et Podor et basse vallée, de Podor à Dagana. A la hauteur de Richard-Toll, le fleuve entre dans le delta, vaste zone d'inondation d'altitude moyenne inférieure à 2 m IGN avec des pentes très faibles, de l'ordre de 0,006 ‰. C'est une région plate et monotone, légèrement accidentée au sud-ouest par la présence de massifs de dunes ogoliennes. Le delta se prolonge par un estuaire où le fleuve se jette dans l'océan Atlantique par une embouchure unique située au sud de la ville historique de Saint-Louis.

Le profil longitudinal du Sénégal indique que le lit du fleuve se situe, sur 450 km, en contrebas de l'océan (en dessous du 0,00 m IGN). Une profondeur maximale de 11,1 m a été mesurée au niveau du Pont Faidherbe (Saint-Louis) par KANE (1985).

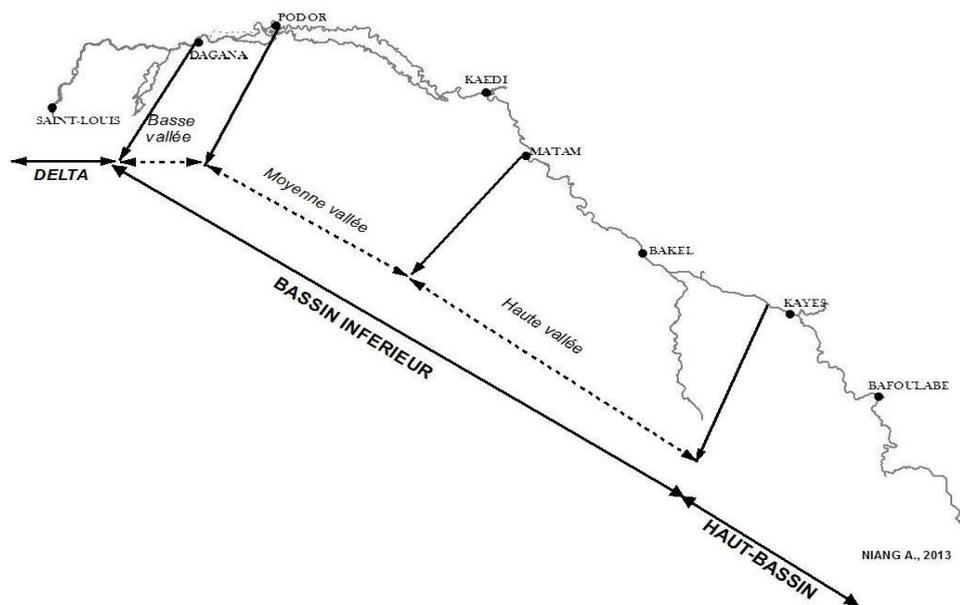


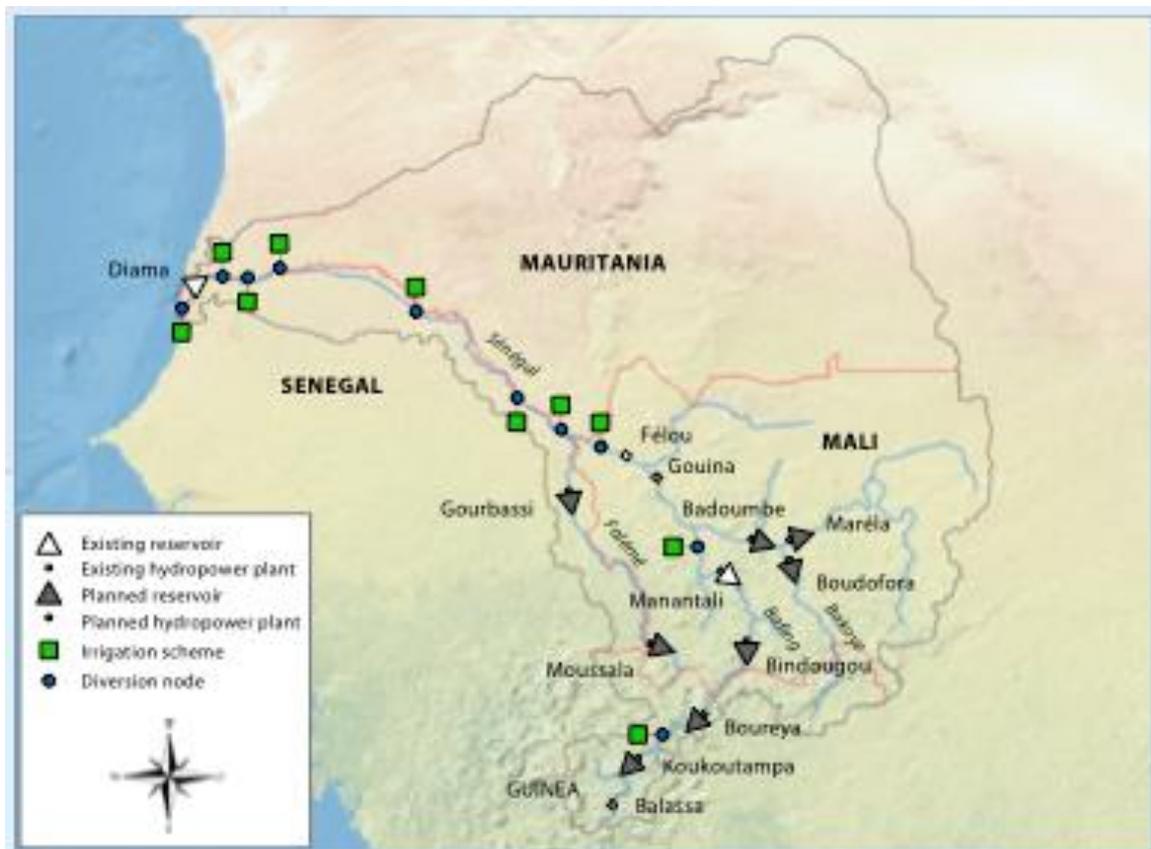
Figure 1 : Zones hydro-géographiques du bassin du Sénégal
(modifié par NIANG (2013) d'après VAN LAVIEREN et VAN WETTEN, 1990)

L'aménagement du bassin du fleuve Sénégal est le fruit d'un long processus en plusieurs phases, marquant plus d'un siècle de réalisations. Débutée à l'ère coloniale dans la partie sénégalaise avec une série d'aménagements artisanaux (GAC *et al*, 1986 ; COGELS, 1984), la mise en valeur du bassin s'est poursuivie et modernisée sous la houlette de l'OMVS, dans un contexte de lutte contre la sécheresse et l'avancée de la langue salée, et d'optimisation des ressources en eau. La mise en service du barrage de Diama en 1985 suivi par celle de Manantali en 1987, marquent le début d'une vision régionale avec des aménagements grande envergure et destinés à faciliter le développement et l'intégration économiques des quatre États riverains du bassin (MAÏGA, 1995 ; OULD MERZOUG, 2005). Le barrage au fil de l'eau de Félou construit

sur le fleuve Sénégal en territoire malien, a été inauguré en décembre 2013. Il constitue le premier d'une série d'ouvrage de 2^{ème} génération dont l'achèvement devrait faire du Sénégal un bassin aux écoulements maîtrisés et à fort rendement économique du fait de l'irrigation et de la production d'hydro-électricité (Tableau 1 ; Figure 2).

Tableau 1 : Projets d'aménagements hydrauliques prévus dans le bassin du fleuve Sénégal
(Source : www.omvs.org)

Nom de l'ouvrage	Type	Situation	Etat d'avancement	Coût	Bénéfice énergétique attendu en GWh
GOUINA	Ouvrage au fil de l'eau	Fleuve Sénégal en territoire malien 80 km en amont de Kayes	Réception prévue en 2017	324 millions Euro	620 GWh puissance de 140 MW
KOUKOUTAMBA	Ouvrage-réservoir	Bafing en territoire guinéen	Étude de faisabilité, APS et APD est faite	181,4 Millions Euros	Production moyenne de 858 Wh/an Puissance installée de: 280,9 MW
BOUREYA	Barrage poids en béton	Bafing en territoire guinéen	Étude de faisabilité et avant-projet disponible	377 millions Euro	717,4 GWh en moyenne Puissance installée de 160,6 MW
GOURBASSI	Ouvrage-réservoir	Falémé à la frontière entre le Mali et le Sénégal	L'étude de faisabilité et avant-projet sommaire disponible	236 millions Euro	104 GWh Puissance installée de 20 à 25 MW



Source: Université Laval, Québec, Canada

Figure 2 : Infrastructures et aménagements hydrauliques existant ou prévus dans le bassin du Sénégal

SYNTHÈSE DOCUMENTAIRE

Le bassin du fleuve Sénégal, fruit d'une histoire géologique complexe, est l'un des organismes les plus étudiés en Afrique de l'Ouest. Plusieurs travaux lui ont été consacrés et ce depuis sa découverte en 1802 avec la publication par l'autorité coloniale française d'un Plan de Colonisation Agricole du Sénégal. Ce plan est resté au stade d'études jusqu'en 1822, date à laquelle sa version revue et corrigée fera l'objet d'une expérimentation, notamment avec le « Jardin d'Essai de Richard-Toll dans le Delta du Fleuve Sénégal ». Il y fut d'abord cultivé des produits d'exportation comme le coton. Ce n'est qu'en 1892 que débutèrent les premières études complètes sur les conditions hydrographiques du fleuve. L'objectif visé était d'asseoir la navigation entre Saint-Louis et Kayes (GAUTRON, 1967). Ces études se termineront en 1908 par la publication des "Instructions Nautiques du fleuve entre Saint-Louis et Kayes". L'OMVS peut donc être perçue comme l'aboutissement d'un long processus de tentatives pour la maîtrise et l'exploitation rationnelle des ressources du fleuve Sénégal et de sa vallée. Après plus d'un siècle d'hésitations et de tâtonnements, la décision de mettre en place des aménagements hydrauliques (barrages) destinés à une mise en valeur du bassin ont dû composer avec la fragilité et la complexité des mécanismes qui les commandent (Niang, 2014).

Ainsi, plusieurs travaux, études, projets et programmes de recherche se sont intéressés au bassin du fleuve Sénégal. Nous pouvons citer entre autres, le programme Environnement et Qualité des Eaux du fleuve Sénégal (EQUESEN) ainsi que le programme de recherche « Observatoire de l'environnement » (GAC et al., 1986 et 1995 ; GAC et KANE, 1986 ; SOW, 1984 ; KANE, 1985 et 1997 ; MICHEL, 1973 ; ROCHETTE, 1974 ; EQUESEN, 1993).

Parallèlement à la collecte des données « brutes », un certain nombre de rapports d'études et de projets ont été identifiés au cours de la phase de collecte des informations de la présente étude. Une liste non exhaustive de l'ensemble de la documentation collectée est donnée en annexe. Les rapports et études identifiés comme les plus significatifs pour la présente étude sont :

1. la monographie réactualisée du fleuve Sénégal ;
2. le programme d'optimisation de la gestion des réservoirs ;
3. les études du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) ;
4. le tableau de bord de gestion de la ressource en eau du fleuve Sénégal ;
5. l'actualisation du recensement des ouvrages de prise d'eau dans le fleuve Sénégal ;
6. les programmes de modélisation et de gestion des ressources des barrages de Manantali et de Diama (SIMULSEN et CORDIAM)
7. 7. Scientific research : IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
- 8.

1. ACTUALISATION DE LA MONOGRAPHIE DU FLEUVE SENEGAL

La première monographie du fleuve avait été éditée en 1974 par ROCHETTE ; elle constituait, avec la thèse de MICHEL (1973), les ouvrages de référence sur le bassin du fleuve Sénégal. En

2011, la réactualisation de la monographie a été entreprise par la SCP¹ et iDEV, un cabinet de droit sénégalais, puis éditée par l'IRD² (BADER, 2013).

Ce document constitue une mine d'informations précieuses pour la présente étude car elle synthétise la plupart des données nécessaires à la modélisation agro-hydrologique envisagée dans le bassin. La monographie se présente comme document en deux parties. La première partie constitue la Monographie du Fleuve Sénégal, à proprement parler. La deuxième partie traite de l'évaluation des crues du fleuve Sénégal.

La première partie, c'est-à-dire la monographie traite des caractéristiques physiques du bassin en distinguant la partie en amont de Bakel et la partie aval. Une description détaillée des caractéristiques physiques de l'ensemble des sous-bassins et des affluents correspondants est donnée. L'accent est mis principalement sur l'hydrographie, le climat, la géologie, la pédologie, la géomorphologie, entre autres. Une synthèse des principaux usages de l'eau y est également fournie. Le deuxième chapitre de la monographie s'intéresse plus particulièrement à l'hydrologie détaillée de l'ensemble des affluents et aborde l'analyse et la validation des données de la base HYDRACCESS de l'OMVS. La deuxième partie de l'étude traite de l'évaluation des inondations dans le bassin du fleuve Sénégal. Un atlas cartographique ainsi qu'un Cd-Rom de recueil de données hydrologiques y est annexé.

2. PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS (POGR)

Le Programme d'Optimisation de la Gestion des Réservoirs plus connu sous l'acronyme POGR est un programme de recherche mené par l'IRD entre 1998 et 2001.

L'étude principale du POGR comportait trois volets :

1. L'étude des débits et des apports en amont, pour affiner la prévision de la crue naturelle des affluents non régularisés et du Bafing une dizaine de jours à l'avance ;
2. La détermination de la crue optimale nécessaire au maintien des cultures de décrue, à la recharge des nappes, à la préservation des écosystèmes, tout en minimisant les pertes de la production électrique ;
3. La mise en place des outils de prévision et de suivi des débits et des instruments de gestion des ouvrages.

Le principal résultat de l'étude a été la réalisation des manuels de gestion hydraulique des barrages de Manantali et de Diama (IRD-OMVS, 2001 et 2004).

Le second volet du POGR était axé sur l'étude des coûts et bénéfices et de la Charte des Eaux du fleuve Sénégal (OMVS, 2000). Cette étude avait été réalisée en 2000 par les bureaux d'études SCP, Coyne & Bellier et SENAGROSOL Consult. Elle avait pour objet de définir les règles d'allocation optimum des ressources en eau du fleuve Sénégal, en réalisant une analyse avantages-coûts des différents scénarios possibles de gestion des ressources, pour proposer le scénario optimal. Les variables suivantes ont été prises en compte :

- les surfaces aménagées pour l'irrigation ;
- la répartition culturelle dans les périmètres irrigués ;

¹ Société du Canal de Provence

² Institut de Recherche pour le Développement

- les taux d'irrigation en hivernage et contre saison ;
- l'efficacité hydraulique des périmètres irrigués ;
- le gabarit de navigation en fonction du débit à lâcher à Bakel ;
- le niveau des autres besoins (AEP, réserves, pâturages, etc.) ;
- le niveau des autres besoins non identifiés, dont les pertes ;
- l'hydrogramme objectif de crue pour maintenir les activités liées à la décrue.

3. SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DE L'EAU (SDAGE)

Le SDAGE se veut d'être l'outil autorisant la prise en compte équilibrée, d'une part, des volontés politiques de développement sectoriel, tel que défini dans les schémas correspondants, et d'autre part, leurs conséquences sur les problématiques du bassin du fleuve (la structure physique, les milieux, les ressources en eau, et les populations qui y vivent et travaillent).

Le SDAGE est ainsi un document programmatique qui oriente la mobilisation des ressources et les impacts sur le milieu. Il doit offrir la capacité aux décideurs de conduire des politiques multisectorielles de façon équilibrée et équitable entre les États.

L'étude du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) a été confiée au groupement SCP/CACG/CSE, et a été réalisé de 2009 à 2011 en trois phases :

- Phase 1 : État des lieux
- Phase 2 : Établissement des schémas sectoriels
- Phase 3 : Établissement du schéma directeur à l'horizon 2025

Phase 1 : État des lieux

L'état des lieux du bassin versant du fleuve Sénégal représente le premier volet du SDAGE. Il s'appuie d'une part sur une bibliographie riche sur les études commanditées par l'OMVS, les gouvernements des États riverains ou des partenaires institutionnels, et d'autre part sur les rencontres organisées dans chaque pays avec les acteurs de l'eau.

Il s'organise autour de trois grandes têtes de chapitre :

1. une présentation des ressources naturelles que sont le sol, les ressources en eau superficielle et souterraine, et enfin la biodiversité ;
2. un état des lieux des activités économiques liées de près ou de loin à l'eau, dont l'agriculture et le secteur énergétique ;
3. l'étude des services publics aux populations que sont l'alimentation en eau potable, l'assainissement, le transport, les services de santé et la protection contre les inondations.

Les tendances ci-dessous se dégagent de l'état des lieux pour les trois (03) grandes zones éco-géographiques du bassin.

La partie guinéenne du bassin qui fait office de « château d'eau », apparaît comme le secteur le plus préservé sur un plan environnemental mais, paradoxalement, celui sur lequel pèsent le plus d'incertitudes pour les prochaines décennies. En effet, riche de ses formations forestières, de son potentiel minier, ce secteur souffre pourtant d'un enclavement important, de menaces diffuses mais croissantes sur ses ressources naturelles et voit – entraînant avec lui tout le bassin

versant - son avenir dépendre fortement des évolutions climatiques des prochaines années. La protection des têtes de source du bassin, la gestion des usages, la protection du sol sont des exemples d'action mis en exergue dans cet état des lieux.

Dans la partie comprise **entre le barrage de Manantali et la station de Bakel**, se pose de manière prégnante la question liée à l'aménagement de retenues d'eau ou de centrales au fil de l'eau, existants ou à venir (voir tableau 1). Ces aménagements ne sont pas sans impacts (positifs comme négatifs), sur le milieu. Le développement économique, la présence de maladies hydriques et bien entendu la gestion de la ressource en eau et de sa répartition à l'aval ; l'extension des périmètres agricoles ; la construction d'infrastructures de transport ; la destruction des forêts ; le surpâturage ; les conflits d'usage du sol ; la multiplication des sources de pollution ; sont autant de menaces potentielles qui pèsent sur cette zone où se retrouvent les trois principaux affluents du fleuve Sénégal que sont la Falémé, le Bafing et le Bakoye. Sur ce secteur se dessine déjà, en filigrane, la possibilité d'imaginer sur chacun de ces affluents des schémas d'aménagement spécifiques.

Plus en aval, **la vallée** se caractérise par une dépendance totale aux apports en provenance de l'amont, qui ne sont qu'en partie régularisés. C'est sur ce territoire que les conséquences du déséquilibre hydrologique observé depuis une quarantaine d'années (baisse de l'hydraulicité couplée à une artificialisation du milieu) sont les plus flagrantes. Ce déséquilibre a en effet conduit à une perte de biodiversité, un assèchement de zones humides, sur un secteur en cours de désertification rendu encore plus vulnérable par l'accroissement de populations et les conflits d'usages du sol. Le cas du lac de Guiers est à ce titre emblématique, puisqu'il concentre dans un espace limité, et de manière contradictoire parfois, tous les espoirs de développement mais aussi tous les écueils environnementaux. Mais l'artificialisation du fleuve Sénégal a eu globalement sur ce secteur un impact positif de la plus grande importance : il a permis la régulation des flux, la réduction des périodes d'étiage sévère, l'atténuation des crues et le développement des périmètres. Avec eux sont malheureusement apparus les problèmes de développement de plantes envahissantes, non maîtrisés à ce jour. C'est sur ce territoire que l'un des objectifs de la Charte des Eaux, à savoir l'intégration des besoins écologiques en eau dans les politiques de gestion et d'aménagement, prend le plus de sens. La réflexion sur la crue artificielle, de nature à satisfaire les besoins en eau des défluent du fleuve et des nappes souterraines entre autres, sera capitale pour la reconquête des milieux et la satisfaction des usages privés, agricoles et industriels de façon durable.

Le **delta** est, quant à lui, une zone tout à fait exemplaire et ce à double titre : secteur écologique de toute première importance à l'échelle de l'Afrique, le delta fait l'objet d'une attention particulière en vue d'en protéger les richesses naturelles, et ce avec succès. La gestion des aires protégées peut servir d'exemple sur d'autres parties du bassin-versant sur lesquels la biodiversité est en danger. Mais, en parallèle, le delta subit aussi, de manière flagrante, les conséquences des aménagements en amont que sont les barrages de Diama et Manantali. Le développement du typha, les difficultés à alimenter les défluent et réseaux, l'impact des digues de protection et la restriction du lit majeur qu'elles induisent, la question du foncier urbain comme agricole sont autant de problématiques qui animent les débats des décideurs locaux.

C'est à l'échelle du bassin tout entier que la question des maladies liées à l'eau se pose : la situation de la santé dans le bassin se caractérise par une faible couverture et un faible accès aux services de soins. Malgré les nombreux efforts consentis dans la lutte contre le paludisme et les bilharzioses, et notamment les actions de l'OMVS, celles-ci sont encore très présentes dans le bassin du Fleuve Sénégal où elles constituent un réel problème de santé publique et un obstacle considérable aux établissements humains et au développement socio-économique de communautés déjà appauvries.

Phase 2 : Établissement des schémas sectoriels

Les sept schémas sectoriels (environnement, inondations, mines-industries, agro-sylvo-pastoralisme et pêche, énergie, AEP et assainissement, transport) ont pour objectif, non pas de proposer aux États membres des objectifs de développement économique, mais bien de fixer, à l'intérieur du périmètre du bassin-versant du fleuve Sénégal, des conditions minimales de gestion des eaux à respecter en faveur des usages humains et de l'environnement, tant sur un plan quantitatif (quel débit ? à quel endroit ? selon quelle saisonnalité ?) que qualitatif (quelle qualité d'eau assurer pour quel usage ?).

En rédigeant ces sept schémas sectoriels, le Consultant s'est efforcé de répondre au mieux aux questions centrales suivantes :

- Quels sont les besoins quantitatifs et qualitatifs pour les milieux naturels et les hommes aujourd'hui ?
- Quelles seront les évolutions des besoins à l'échéance fixée par le SDAGE à 2025 ? Cette question en sous-tend une autre, tout aussi essentielle : quelle sera l'évolution quantitative de la ressource à l'horizon 2025 ? La problématique fondamentale du changement climatique est au cœur de chacun des schémas.
- Comment évoluera l'agriculture irriguée dans le bassin d'ici 2025, avec quelle conséquence sur la ressource en eau ?
- Les activités économiques connaîtront-elles des modifications d'ici 2025, qui pourraient impacter la qualité de l'eau du fleuve et de ses affluents ?
- La santé publique pourra-t-elle dans ce délai bénéficier des progrès attendus en matière d'accès à l'eau potable et de développement de l'assainissement ?

Des sept schémas étudiés ressortent plusieurs idées forces listées ci-après.

Des efforts ambitieux sont attendus pour **étendre et moderniser l'agriculture irriguée** : Alors que le potentiel des terres irrigables est actuellement d'un peu plus de 170 000 hectares (dont seulement la moitié est réellement cultivée), les comités nationaux de concertation – comme l'atelier régional – ont affiché l'ambition de porter ce potentiel à 255 000 hectares à l'horizon du SDAGE, s'appuyant en cela sur les conclusions de l'étude PARACI II publiée en 2009 (références). Cette augmentation des surfaces irriguées s'appuierait d'une part sur des réhabilitations de périmètres, puis sur la création de nouveaux périmètres (au-delà de 2015).

Cet objectif est très ambitieux au vu des rythmes de réhabilitation ou de création de périmètres observés ces dernières décennies. Il nécessite un investissement très important, affiché dans le schéma sectoriel « agriculture ». Il aura pour conséquence le triplement de la ressource en eau nécessaire aux besoins agricoles. Ceci conduit logiquement à promouvoir les prochaines

décennies des techniques d'irrigation économes en eau. Si l'OMVS assume, sur cette thématique, des études structurantes, et a engagé des programmes de travaux importants, ce sont bien les États, et leurs sociétés d'aménagement (SAED, SONADER, ...) qui ont la responsabilité de la réussite de cet ambitieux programme.

La non-dégradation des milieux et leur reconquête reste un objectif central de l'OMVS. La phase 1 du SDAGE a mis en évidence une dégradation des milieux naturels, due d'une part à une période de sécheresse dans les années 1970-80, couplée d'autre part à une forte pression humaine et à la modification du régime fluvial (aménagements).

Des différents scénarii envisageables à l'horizon 2025, l'OMVS a opté pour la solution la plus ambitieuse : la reconquête du bon état des milieux. Celle-ci passe par une amélioration de la qualité des eaux, une maîtrise des plantes envahissantes, l'amélioration de la résilience des milieux et des communautés et le renforcement des protections réglementaires des milieux à enjeux. Elle exige de concevoir les futurs ouvrages multi-usages comme une opportunité pour reconquérir l'environnement.

Les besoins énergétiques sont considérables à l'échelle du bassin-versant et des pays membres de l'OMVS. En termes d'énergie, la demande actuelle des Etat membres tourne autour de 4 400 GWh, alors que la production de Manantali pèse 800 GWh, soit environ 18% de la demande. Si les taux d'accroissement se maintiennent dans l'ensemble des réseaux d'électricité des États membres, les besoins énergétiques en 2025 seront de l'ordre de 9 735 GWh. Pour répondre à ces besoins, l'équipement de centrales hydro-électriques sur les affluents du fleuve est envisagé : l'équipement exhaustif du seul Bafing permettrait la production de 3715 GWhs, tandis que l'équipement maximal de tous les affluents permettrait la production de 7400 GWhs, répondant ainsi à 76% des besoins en 2025.

L'équipement hydro-électrique revêt donc un enjeu qui dépasse les limites du seul bassin-versant : grâce aux interconnexions des réseaux électriques de l'Afrique de l'Ouest, il concernera les quatre pays membres de l'OMVS et leurs voisins.

Les objectifs du Millénaire pour le Développement sont au centre de la politique de santé publique. L'accroissement du taux d'accès à l'eau potable, et le développement d'équipement d'assainissement autonome ou collectif, apparaissent à une place centrale dans les schémas sectoriels. Si les taux d'accès à l'eau potable sont faibles à moyens (situation difficile sur les têtes de bassin), l'accès à l'assainissement est clairement insuffisant à l'échelle du bassin versant du fleuve. Le faible accès à l'eau potable a des conséquences néfastes en termes de santé publique : les maladies liées au péril fécal se développent d'autant plus que l'accès à une eau potable est limité. L'insuffisance d'accès à l'assainissement contribue par ailleurs au développement des bilharzioses. D'importants foyers de ces maladies sont présents dans tous les secteurs du bassin, depuis les têtes de bassin jusqu'au delta. Un programme d'investissement ambitieux est donc envisagé dans le schéma sectoriel AEP/assainissement, basé autour du développement de points d'accès d'eau et d'équipement d'assainissement non collectif. L'impact quantitatif des besoins en eau potable pour alimenter les habitants du bassin versant, demeure tout à fait marginal à l'échelle du bassin.

Le développement industriel s'articule autour des grands projets miniers de fer et de phosphates, qui nécessitent des infrastructures de transport et des ressources en eau. Le choix d'exploiter le potentiel industriel et minier du bassin a été clairement affiché par les acteurs rencontrés à l'occasion de l'écriture du SDAGE.

Si le potentiel de développement de l'agro-industrie demeure entier (conserveries dans le haut pays, industries du riz, du maïs ou de l'élevage dans la vallée ou le delta), il dépend fortement du développement des activités primaires que sont l'agriculture ou l'élevage, conditionnées par le développement des infrastructures liées à l'accès à l'eau et par le développement des filières. Il pourra largement bénéficier de la meilleure maîtrise de la ressource en eau dans le bassin et du développement des réseaux de distribution électrique.

Le potentiel minier est quant à lui tout à fait majeur : à l'horizon du SDAGE, ce sont les exploitations de phosphates (vallée) et de fer (Falémé) qui devraient se développer de manière significative. Avec les autres exploitations de minerai, elles nécessiteront la mobilisation de 170 MW de puissance installée et environ 250 millions de m³ d'eau prélevés sur la ressource locale, essentiellement dans la Falémé.

Les schémas sectoriels touchant à l'industrie, aux activités minières, à l'agro-sylvo-pastoralisme ainsi qu'à l'eau potable précisent l'ensemble des besoins en eau, directs ou indirects des Hommes et de leurs activités à l'horizon 2025 dans le bassin versant du fleuve Sénégal :

Les besoins en eau du milieu naturel, quant à eux, devront être précisés au travers des études proposées dans le présent SDAGE. Si les crues observables actuellement ne semblent pas de nature à répondre aux besoins des milieux naturels et mettent ainsi en péril les aménités liées, il n'en est pas moins vrai que les conditions du bon état écologique des zones humides liées au fleuve sont encore peu ou mal appréhendées.

Les prochaines années devraient également permettre d'avoir un retour d'expérience intéressant sur la gestion des eaux dans des défluent du fleuve comme le Diawling.

Les besoins en eau à l'horizon 2025 :

- **Agriculture** : Si les besoins en eau de l'agriculture irriguée sont d'environ 1,4 milliards de m³/an aujourd'hui, les projections faites à l'horizon 2025 nous conduisent à envisager des besoins 3,5 fois plus importants.
- **Mines** : Les besoins en eau des activités minières se montent à 235 millions de m³/an, dont l'essentiel pour la mine de fer de la Falémé. Ces volumes sembleraient modestes s'ils n'étaient pas prélevés majoritairement sur un seul affluent du fleuve Sénégal, à savoir la Falémé.
- **Agro-industries** : Les agro-industries devraient à l'horizon du SDAGE se développer, surtout dans le delta et la vallée autour des rizeries, sucreries et usines de transformation de la viande, ainsi que dans le haut bassin autour des conserveries de fruits ou légumes. Leur impact sur la ressource en eau apparaît négligeable, en rapport avec les besoins de la production primaire (agriculture) afférente.
- **Population** : En 2025, une population de 9,7 millions d'individus est attendue à l'intérieur du bassin-versant. Le SDAGE considère que seuls 20 millions de m³

seront prélevés directement dans le fleuve, le reste étant prélevé dans des aquifères. Enfin, il est à noter que des transferts d'eau importants impactent directement la ressource en eau superficielles, respectivement vers Dakar et Nouakchott, pour un volume annuel attendu de 110 millions de m³. C'est donc 130 millions de m³ qui seront prélevés pour l'eau potable dans le fleuve à l'horizon 2025, ce qui ne représente que 10% des prélèvements actuels pour l'agriculture irriguée, et 2,6% de ces mêmes prélèvements à l'horizon 2025 (dans l'hypothèse pessimiste de développement agricole).

- **Élevage** : Le SDAGE évalue les besoins en eau pour l'élevage à l'horizon 2025 à 84 millions de m³/an (contre 61 millions aujourd'hui). Il est à rappeler que cette activité concerne 60% de la population rurale du bassin et pèse entre 4 et 12% du PIB des pays riverains du fleuve.

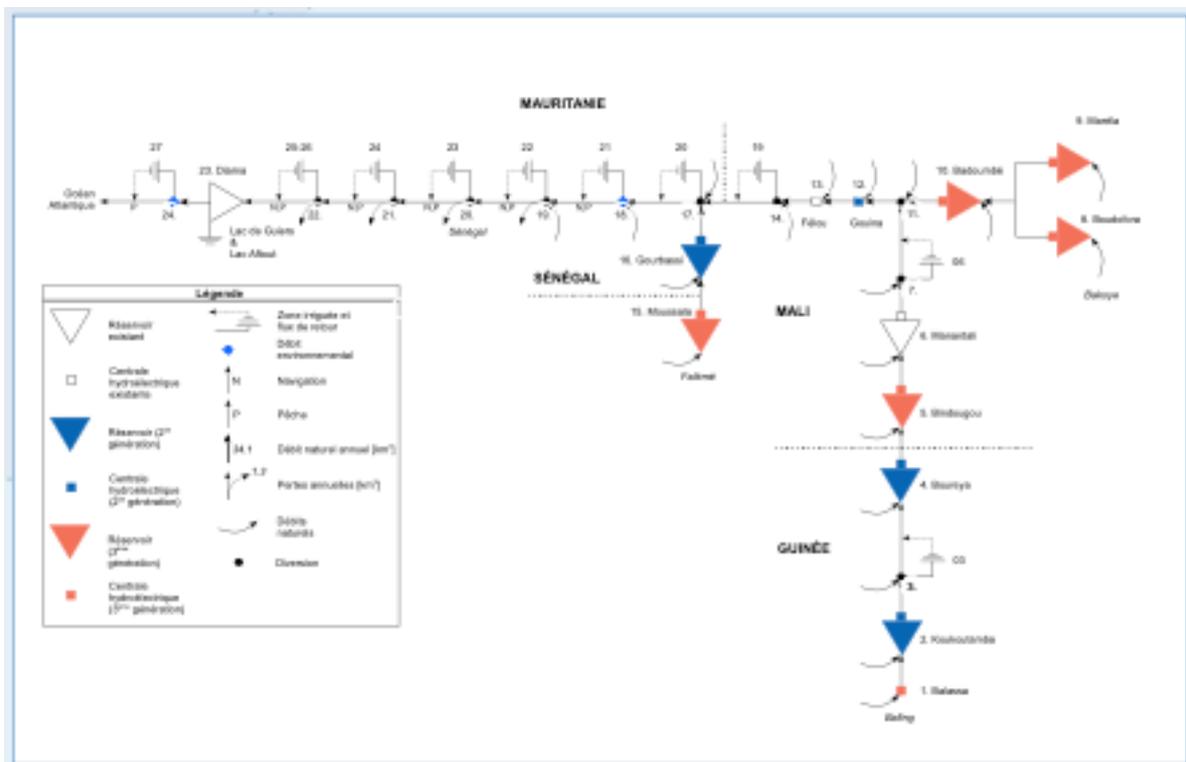


Figure 3 : Schématisation du bassin du fleuve Sénégal (Salman et al., 2018)

Phase 3 : Établissement du schéma directeur à l'horizon 2025

La question centrale en termes de gestion de la ressource en eau dans le bassin du fleuve Sénégal est la suivante : quel scénario de construction de barrages est le meilleur pour répondre aux besoins croissants de l'agriculture, et aux besoins plus limités – mais ô combien stratégiques – pour l'eau potable, l'alimentation du bétail et le développement industriel et minier, tout en préservant les enjeux environnementaux mis en évidence dans le schéma sectoriel environnemental du SDAGE ?

Pour répondre à cette question, l'OMVS a mis en œuvre un modèle de gestion, capable de modéliser l'impact des futurs ouvrages hydrauliques projetés dans le bassin sur la ressource en eau. Les résultats de ce modèle permettent de fixer les tendances et d'apprécier les impacts

positifs et négatifs des options d'aménagement du bassin, et des choix de consigne de gestion des ouvrages.

Trois scénarios ont été envisagés :

- le premier considère que seuls les ouvrages de Félou, Manantali et Diama seront construits et mis en service d'ici 2025 ;
- le deuxième envisage, en sus, la construction du barrage de Koukoutamba ;
- le troisième envisage quant à lui les aménagements ci-dessus complétés par les ouvrages de Gourbassi, Boureya et Balassa.

Les enseignements à tirer du modèle sont les suivants :

- les besoins quantitatifs pour l'alimentation des populations et du cheptel ne posent aucun problème à l'horizon 2025 ;
- les contraintes imposées par le projet de navigation sont parfaitement intégrées quels que soient les scénarios ;
- la satisfaction des besoins en eau des industries minières nécessitera une sécurisation, notamment sur la Falémé, et passera notamment par la construction du barrage de Gourbassi
- La satisfaction des besoins en eau agricole n'est assurée que lors des années de bonne hydraulité. Seuls 4,6 milliards de m³/an sont disponibles 9 années sur 10. Cela renforce la nécessité de rechercher des modes d'irrigation économes en eau.
- Si l'objectif de culture de décrue de 50.000 hectares est satisfait 8 années sur 10, l'atteinte d'un hydrogramme plus ambitieux (hydrogramme de ROCHE) n'est envisageable que 4 à 5 années sur 10.
- Concernant le productible, le scénario n°3 offre un potentiel augmenté de 130% par rapport au premier scénario.
- Enfin, le modèle indique que le fait de favoriser la crue naturelle a un impact positif sur l'irrigation, en ne dégradant le productible que de 1 à 5 %.

Une analyse coûts-avantages sommaire a été menée sur les trois scénarii testés, intégrant les coûts inhérents à chacun mais aussi les avantages énergétiques, environnementaux et économiques.

4. TABLEAU DE BORD DE GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU DU FLEUVE SENEGAL

En parallèle aux autres outils de gestion des eaux du fleuve, l'OMVS a souhaité se doter d'un outil d'appui à la gestion des eaux du fleuve Sénégal sous la forme d'un tableau de bord. Ce tableau de bord doit répondre aux besoins suivants :

- Centraliser, organiser, synthétiser l'ensemble des données sur les ressources hydriques du fleuve et sur les usages qu'elles permettent ;
- Permettre la publication en temps réel ou légèrement différé de cette information synthétisée et son partage entre les principaux acteurs de la gestion ;
- Doter l'OMVS d'un outil capable d'effectuer des bilans besoins-ressources sur des scénarios de besoins, et d'apporter une véritable aide à la décision.

5. ALLOCATION OPTIMALE DE L'EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE SENEGAL

Chaque état riverain du fleuve Sénégal fait face à des problèmes similaires de pénuries et de demandes croissantes en énergie. La production énergétique de la centrale de Manantali, seul aménagement hydroélectrique fonctionnel sur le bassin couvre moins de 18% des besoins. De même on note un besoin pressant de maîtriser les affluents majeurs du fleuve pour réduire les impacts de la sécheresse et des fortes crues sur l'environnement et faciliter la pratique d'activités connexes telle l'irrigation et la navigation au niveau de la vallée et du delta. La gestion des ressources en eau reste donc un enjeu capital pour la croissance économique des états riverains du fleuve. L'objectif à long terme de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) est de renforcer l'économie de ses états membre en plaçant la gestion et la mise en valeur collective des ressources en eau au centre de ses priorités. Il s'agit là, d'ici l'échéance fixé à 2025, d'étendre les aménagements hydroélectriques dans le haut bassin de manière à atteindre une puissance installée de 1050 MW et d'assurer un soutien d'étiage adéquat pour le développement de l'agriculture irriguée et de la navigation au niveau de la vallée et du delta.

Cette étude analyse les impacts de ces éventuels aménagements sur le régime hydrologique du fleuve. Une approche analytique par scénario a été testée dans le système d'aide à la décision Water Evaluation And Planning (WEAP). Il s'agit d'un modèle de simulation et de gestion des bassins hydrographiques qui réalise un bilan volumique conservatif des masses d'eaux entrantes et sortantes sur l'ensemble de la durée de la chronique des apports compte tenu des consignes de gestion et des contraintes physiques du système. WEAP permet l'édition et l'analyse des grandeurs utiles relatives au fonctionnement des bassins hydrographiques. Les résultats des simulations montrent que le contexte actuel d'aménagement du bassin permet de garantir (en moyenne 8 années sur 10) une production d'énergie annuelle de 700 GWh tout en satisfaisant les besoins en soutien des basses eaux de la vallée et du delta qui sont évalués à 1567 Mm³ /an. Toutefois l'extension des aménagements agricoles et la prise en compte de la navigation fluviale entre Kayes et Saint-Louis aura pour conséquence d'établir une compétition entre la production d'énergie à Manantali et le soutien d'étiage, particulièrement durant la saison des basses eaux entre décembre et mai. Les déficits d'allocation observés varient entre 8 et 20% selon que l'état d'hydraulicité du fleuve est humide ou sec. Les impacts de l'aménagement du haut bassin par la mise en service des barrages de Koukoutamba, Boureya et Gourbassi dans le scénario 3 restent importants et positifs. En effet, outre l'accroissement de près de 410% de la production d'énergie hydroélectrique, Koukoutamba et Boureya régulent les débits entrants à Manantali durant la saison des basses eaux, se traduisant par une augmentation du niveau de fonctionnement du réservoir de Manantali et par conséquent une réduction de plus de 50% des déficits de soutien des basses eaux au niveau de la vallée et du delta. Durant la saison des hautes eaux, la réduction des volumes entrants à Manantali due au remplissage des retenues de Koukoutamba et Boureya réduit de près de 60% les déversements de Manantali durant les années humides et de 15% le niveau de fonctionnement de la centrale durant les années sèches consécutives.

6. PROGRAMMES DE MODELISATION ET DE GESTION DES RESSOURCES DES BARRAGES DE MANANTALI ET DIAMA

6.1. *Simulation de gestion d'un barrage à objectifs multiples, au pas de temps journalier*

Le logiciel SIMULSEN est principalement destiné à simuler la gestion opérationnelle d'un barrage à objectifs multiples sur une longue période, par un calcul effectué au pas de temps journalier. Il permet d'évaluer la satisfaction de ces objectifs, en fonction des apports en eau et des consignes de gestion envisagées. Accessoirement, il permet de définir certaines consignes de maintien de stock ou de revanche dans la retenue.

Ce logiciel a été développé spécialement pour le cas du barrage de Manantali (Bader et al., 2003), qui est implanté au Mali sur la rivière Bafing, affluent du fleuve Sénégal. Il peut néanmoins être utilisé pour tout barrage dont les objectifs sont parmi les suivants :

- Production d'énergie électrique ;
- Soutien des étiages ou des faibles crues à la sortie du barrage ou au niveau d'une station située à l'aval, pour différents usages : irrigation, alimentation en eau potable, cultures de décrue, navigation....
- Laminage des fortes crues, à la sortie de l'ouvrage ou à une station située à l'aval ;
- Niveaux extrêmes à atteindre ou ne pas dépasser par le plan d'eau dans le réservoir.

Les simulations effectuées par SIMULSEN consistent à calculer chaque jour le débit lâché du barrage, en tenant compte des éléments suivants :

- les contraintes de gestion imposées par les caractéristiques physiques de l'ouvrage ;
- les consignes de sécurité visant à protéger l'ouvrage ; et
- les consignes de gestion associées aux objectifs de l'ouvrage.

En fonction de la situation hydrologique, ces contraintes et consignes imposent chacune une limite minimale ou maximale sur le débit total pouvant être lâché du barrage. Prises en compte par ordre de priorité décroissante, ces limites sont alors combinées pour en déduire le débit total à lâcher du barrage. Dans la documentation, on peut trouver le type de contraintes et de consignes pouvant être simulées par ce logiciel.

6.2. *Projet COREDIAM*

Ce logiciel permet d'évaluer le niveau prévu aux différentes stations influencées par le barrage de Diama en fonction de deux paramètres :

- a) la cote observée à une station influencée de l'amont (Bakel), station « pré-iseur » ;
- b) la cote dans le lac (cote amont de Diama).

La fonction essentielle de ce logiciel est de calculer la courbe de remous du barrage de Diama établie classiquement pour un niveau constant dans la retenue et un débit constant arrivant à l'amont, et d'adapter le modèle de propagation de Lamagat (BADER, 1992) en y introduisant, pour les stations influencées par Diama, non plus une, mais deux entrées. A savoir : la cote à une station non influencée à l'amont, et la cote dans la retenue de Diama.

La thèse de Niang (1999) a utilisé les données satellitaires Spot pour la mise en place d'un Système d'Information Géographique (SIG), appelé SIG Guiers ; ce qui a permis la centralisation des informations relatives à la gestion des eaux du lac de Guiers. Le volet

quantitatif porte sur la « gestion du système hydraulique » notamment sur celle de la jonction fleuve-lac. Il s'agissait d'optimiser les trois outils de gestion (COREDIAM, SIMULSEN, et LGPLG³) et de procéder à leur intégration pour une planification des lâchers à Manantali basées sur les besoins du lac de Guiers et leur répartition spatiale et temporelle.

Dans le cadre du Projet SENEGAL-HYCOS, (2012), il a été proposé de mettre en place un dispositif, basé d'une part sur la mise à jour du réseau d'observation et de télécommunication et d'autre part sur le renforcement des capacités nationales (Services hydrologiques nationaux) et régionales (OMVS), d'exploiter les données et les traduire en informations susceptibles d'améliorer les capacités de gestion des ressources en eau dans le bassin. Les outils ont été identifiés : PROGEMAN (outil de gestion du barrage de Manantali) ; GESDIAM (outil de gestion du barrage de Diama) ; COREDIAM (outil de calcul de la courbe de remous du barrage de Diama) ; SOE-FSEN (gestion des données environnementales) ainsi que le modèle pluie-débit du Haut-Bassin.

7. PROGRAMME D'ATTENUATION ET DE SUIVI DES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT (PASIE)

Ce programme a été mis en œuvre par l'OMVS pour pallier toutes les insuffisances engendrées par la mise en eau des barrages de Manantali et de Diama, ainsi que les aménagements qui en ont résulté (endiguements, aménagements hydro-agricoles, etc.) dans le delta et la vallée du Sénégal. Le PASIE intègre l'ensemble des mesures d'atténuation et de suivi qui doivent être mises en œuvre lors de la réalisation et de l'exploitation du projet énergie et en définit les modalités d'application et les coûts, sans distinction de ceux qui sont imputables ou non au projet énergie (OMVS, 1997). Ce programme, cofinancé par la Banque mondiale, la Banque africaine de développement, la Coopération française et la Coopération canadienne, visait à définir et à mettre en œuvre une série d'actions s'intégrant dans une stratégie globale de protection et de préservation de l'environnement. Ce programme est constitué de 5 parties :

- Programme d'atténuation des impacts et de surveillance de la construction,
- Programme d'appropriation des empires,
- Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs,
- Programme de suivi et de protection de l'environnement durant l'exploitation et,
- Programme de santé environnementale.

8. PHASE 2 DU PROJET DE GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE SENEGAL

Le Programme de Gestion Intégrée des Ressources en Eau et de Développement des Usages Multiples dans le Bassin du fleuve Sénégal (PGIRE) de l'OMVS est une intervention à vocation régionale qui concerne les quatre États riverains du fleuve Sénégal : la Guinée, le Mali, la Mauritanie, et le Sénégal (OMVS, 2013). Il vise à promouvoir le développement économique et social de ces États, conformément aux Missions de l'OMVS et en accord avec les stratégies de la Banque Mondiale en matière d'intégration régionale, dans le secteur de l'eau et de l'assistance aux pays. Le PGIRE inclut les activités du FEM, du Trust Fond, du programme de développement du Sahel (PDS) et le Programme de Développement Rural Intégré en Mauritanie (PDRI). A cet effet, le vocable PGIRE II utilisé dans les pages de ce rapport désigne

³ Logiciel de Gestion et de Planification du Lac de Guiers développé par Noël Evora et François-Xavier Cogels

l'ensemble des activités initiales et additionnelles financées au titre du PGIRE, FEM, TF, PDS et PDRI. Le PGIRE vise à promouvoir la croissance et à améliorer, de manière significative, les conditions de vie des populations dans le Bassin du fleuve Sénégal où un recul de la pauvreté est escompté. A court et moyen termes, le programme vise, par le développement au niveau local d'usages à buts multiples des ressources en eau, à promouvoir des activités de production qui généreront des revenus pour les populations locales. Il a pour ambition d'améliorer le cadre qui sous-tend le développement du bassin à travers des interventions de consolidation et de modernisation des institutions.

Partant l'état de l'art de la quasi-totalité de la documentation dans le bassin versant du fleuve Sénégal, nous pouvons faire une synthèse pour déterminer l'impact du changement climatique.

9. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La CCNUCC fait la différence entre la variabilité du climat et le changement climatique. La variabilité se réfère à la variation dans le temps des conditions naturelles du climat. Les modes de vie et systèmes de production des populations locales sont en général très adaptés aux variations d'ampleur faibles ou moyennes du climat. C'est le cas par exemple des variations intra et interannuelles dans la pluviosité et l'hydraulicité du fleuve. Cependant les stratégies d'adaptations montrent leurs limites lorsque ces variations sont de grande ampleur (sécheresse de longue durée ou crues exceptionnelles comme celles centenaires ou millénaires).

C'est en réponse à la vulnérabilité à ces événements extrêmes et en particulier à la sécheresse des années 1970 que la décision de créer l'OERS a été prise en 1968 –devenue l'OMVS en 1972– pour servir de cadre de développement concerté des ressources du bassin, avec un accent particulier sur la mobilisation d'investissements dans des ouvrages majeurs de maîtrise de l'eau du fleuve Sénégal.

Le changement climatique est dû au réchauffement de la planète, résultant de l'émission de gaz à effet de serre. Pour la CCNUCC, les changements climatiques se réfèrent à « des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables » (Article 1 de la CCNUCC)⁴. Dans le secteur de l'eau, le changement climatique se traduit par deux types de changements : (a) d'abord par des changements par rapport aux conditions « normales » du climat comme l'augmentation ou la baisse de la pluviométrie et/ou de l'hydraulicité moyenne ; ensuite par des changements dans l'ampleur et la fréquence des événements extrêmes – inondations et sécheresse (Sullivan et al., 2002⁵). Le changement climatique crée des conditions « nouvelles » dans lesquelles les stratégies traditionnelles d'adaptation à la variabilité climatique deviennent souvent inopérantes, même si on constate qu'un haut niveau d'adaptation à la variabilité

⁴ Nations Unies. 1992. Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique. New York. Accessible à : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>

⁵ Sullivan, C.; J. Meigh and M. Acreman. 2002. Scoping Study on the Identification of Hot Spots – Areas of high vulnerability to climatic variability and change identified using a Climate Vulnerability Index. Report to Dialogue on Water and Climate. Centre for Ecology and Hydrology (CEH). Wallingford, United Kingdom

naturelle du climat augmente le niveau de préparation et de résilience face aux impacts du changement climatique.

A quel climat futur peut-on s'attendre dans le bassin du fleuve Sénégal au cours des prochaines décennies ?

En vue de tenter de répondre à cette question, nous avons examiné une partie (assez représentative) de l'abondante documentation sur le changement climatique à l'échelle mondiale (rapports d'évaluations du GIEC, y compris le 5^e rapport de 2014), régionale (sur l'Afrique de l'Ouest et la Sahel), du bassin du fleuve et à l'échelle des pays riverains, avec notamment les rapports d'adaptation nationaux au changement climatique (PANA) et les contributions prévues, déterminées au niveau nationales (CPDN) élaborés dans le cadre de la CCNUCC. Les analyses de scénarios de changements climatiques faites dans ces documents s'appuient typiquement sur des modèles hydrologiques et des modèles climatiques régionaux utilisant des sorties de modèles climatiques globaux, et en particulier ceux utilisés dans les rapports d'évaluation du GIEC. Les modèles globaux débouchent souvent sur des résultats imprécis et contradictoires d'un modèle à l'autre. Le passage des modèles globaux aux modèles régionaux (par désagrégation spatiale) amplifie les incertitudes. Un défi additionnel est de s'appuyer sur les résultats de modèles régionaux pour prédire l'évolution du climat à l'échelle sous régionale, comme c'est le cas du bassin du fleuve Sénégal. Il s'y ajoute qu'à l'inverse de bassins fluviaux tels que la Volta ou le Congo, le fleuve Sénégal n'a pas fait l'objet d'une analyse systématique de scénarios de changements climatiques, ceci en dépit du fait qu'un tel exercice y est moins hasardeux étant donné que le bassin du fleuve Sénégal dispose de données hydrologiques plus complètes. A défaut d'une étude systématique sur le changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal, les scénarios discutés ci-après restent très indicative de futurs possibles.

Les conclusions des études consultées font ainsi état de grandes incertitudes en ce qui concerne la plupart des caractéristiques du climat futur en Afrique de l'Ouest et en particulier dans le bassin du fleuve Sénégal. Le seul domaine où on note une convergence des prédictions climatiques du bassin du fleuve concerne la température. Les différentes études s'accordent sur le fait que la température moyenne du bassin sera plus élevée que la moyenne observée actuellement. Il est même prévu que le niveau d'augmentation de la température dans le bassin du fleuve Sénégal et en Afrique de l'Ouest sera supérieur à l'augmentation de la température à l'échelle du globe (ARTELIA et al., 2013⁶ ; TRACTEBEL et al., 2012⁷ ; Gaye et Ndiaye, 2015⁸ ; et PANA et CPDN de la Guinée, du Mali Sénégal et de la Mauritanie⁹).

⁶ ARTELIA ; Union de Coteba & SOGREAH. 2013. Aménagement hydroélectrique de Bouréya en Guinée. Etude de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS). OMVS. Dakar, Février.

⁷ TRACTEBEL ENginerIn, GDF Suez & Coyne et Bellier. 2012. Projet hydroélectrique de Koukoutamba. Avant-projet détaillé (APD). Chap. C1. Hydrologie :

⁸ A.T. Gaye ; O. Ndiaye. S.d. Elaboration de scénarios climatiques dans le cadre volet adaptation de la Contribution Prévue Déterminée au niveau National (CPDN). 2015. DEEC. Sénégal.

⁹ Les documents suivants ont été consultés : (i) MAEEEF (RG). 2007. PLAN D'ACTION NATIONAL D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES (PANA) DE LA république de GUINEE. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage, de l'Environnement, des Eaux et Forêts (MAEEEF)/Conseil National de l'Environnement. Conakry. Juillet. ; (ii) MET (RM). 2007. Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques. Ministère de l'Equipement et des Transports (MET)/Direction Nationale de la Météorologie. Bamako. Juillet ; (iii) République du Mali. 2015. Contribution Nationale Déterminée au Niveau National (CPDN). CCNUCC. Septembre. ; (iv)

MEDD (RIM). 2015. Contribution Prévue Déterminée au Niveau National de la Mauritanie à La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD)/Cellule de Coordination du

Les prédictions divergent en ce qui concerne la pluviométrie et les écoulements futurs, et par conséquent aussi en ce qui concerne les aquifères non fossiles. Alors que ARTELIA et al. (2013) prévoient une augmentation de la pluviométrie dans le haut bassin, tous les autres auteurs (Mbaye et al., 2015 ; ¹⁰, Gaye et Ndiaye, 2015 ; ainsi que les PANA et CPDN des pays riverains) prédisent le contraire. En ce qui concerne les écoulements, les prévisions sont tout aussi contradictoires. Même si la plupart des études prévoient une baisse plus ou moins importante des écoulements du fleuve dans les décennies à venir (Adoin-Bardin et al., 2009¹¹ ; Bader et al., 2012¹² ; Bodian et al, 2015¹³ ; Gaye et Ndiaye, 2015 ainsi que les PANA), il existe des avis divergents, en particulier en ce qui concerne la partie guinéenne du haut-bassin. Mbaye et al. (2015) y prévoient une augmentation de 50% des écoulements.

Ces incertitudes concernent aussi les événements extrêmes (orages et vents dévastateurs, inondations, sécheresses sévères, etc.) qui pourraient être plus fréquents et/ou de plus grande ampleur. Le tableau suivant fait un résumé rapide des principales prédictions de changement climatique concernant le bassin du fleuve et les pays riverains.

Tableau 2 : Prédictions climatiques dans le bassin du fleuve du Sénégal selon diverses sources.

	Zone ciblée	Température	Pluviosité	Écoulements	Eaux souterraines	Evènements extrêmes
(a) ARTELIA et al. 2013.	Haut-Bassin/Bafing : Bouréya (Guinée)	++	+			
(b)TRACTEBEL et al. 2012.	Haut-Bassin/Bafing : Koukoutamba (RG)	+				
(c) Ardoin-Bardin et al. 2009	Afrique de l'Ouest/BFS			-		
(d) Bader, 2012	Bassin du fleuve Sénégal			-		
(e) Mbaye et Ndiaye, 2015	Haut Bassin du Sénégal		-	-/+		
(f) Bodian et al. 2015	Bassins Afrique de l'Ouest/bassin du Sénégal			-		
(g) Gaye et Ndiaye, 2015	Echelle nationale Sénégal	+				
(h) MAEEEF (RG). 2007.	Echelle nationale Guinée/PANA	+	--	-		+

Programme National sur le Changement Climatique (RIM). Nouakchott. Septembre. ; (v) MEDD (RIM). 2014. Troisième communication nationale sur le changement climatique. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD)/Cellule de Coordination du Programme National sur le Changement Climatique (RIM). Nouakchott. Juillet. ; (vi) Gouvernement du Sénégal. 2006. Plan d'Action National pour l'Adaptation aux Changements climatiques. Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature. Dakar ; (vii) MEDD (RS). 2015. Contribution Prévue Déterminée au Niveau National (CPDN). Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. Dakar. Septembre.

¹⁰Mbaye, M.L., Hagemann, S., Haensler, A., Stacke, T., Gaye, A.T. et Afouda, A. (2015) Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in the Upper Senegal Basin (West Africa). *American Journal of Climate Change*, **4**, 77-93. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2015.41008>

¹¹Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Paturel J.-E., Mahé G., Niel H., Dieulin C., (2009) Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, **54**, 77-89.

¹²Bader, J.C. 2013. Actualisation de la monographie hydrologique du fleuve Sénégal. Rapport final. IRD -IDEV-SCP-OMVS. Dakar. Février.

¹³Bodian. A. ; A. Dezetter ; L. Diop. 2015. Evolution des apports en eau au barrage de Manantali à l'horizon 2050. Texte présenté à la Conférence Internationale sur l'Hydrologie des Grands Bassins Fluviaux de l'Afrique. 26-30 Oct 2015. Hammamet (Tunisie). IRD, INAT, FRIEND-Water.

	Zone ciblée	Température	Pluviosité	Écoulements	Eaux souterraines	Evènements extrêmes
(i) MET, 2007 (RM) ; RM. 2015	Echelle nationale Mali/PANA (2007) et CPDN (2015)	+	-			
(j) MEDD (RIM) 2014 et 2015	Echelle nationale Mauritanie/TCN (2014) ; CPDN (2015)	+	-	--	-	+
(k) MEDD (RS), 2006 et 2015	Echelle nationale, 2006 (PANA) ; 2015 (CPDN)	+	--			++
Synthèse des prédictions		+	-	-	-	+

En prenant seulement en compte les avis majoritaires, on peut dire que le changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal dans les 5-10 décennies à venir va se manifester par :

- (a) une augmentation significative de la température moyenne ;
- (b) la baisse de la pluviométrie moyenne, baisse moins prononcée dans les sources du fleuve en Guinée que dans le reste du bassin ;
- (c) la baisse des écoulements moyens ;
- (d) la baisse du niveau statique des aquifères ; et,
- (e) une plus grande ampleur et fréquence des évènements extrêmes (inondations, sécheresse, etc.).

Les schémas ci-dessus illustrent de façon simplifiée ce qui distingue le contexte présent de variabilité naturelle du climat du contexte de changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal.

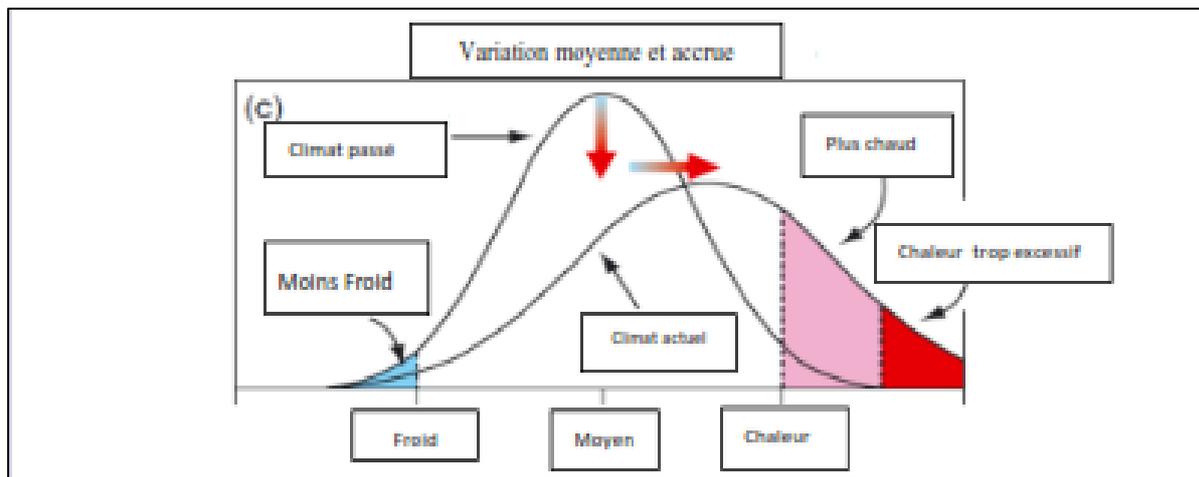


Figure 4: Illustration de l'effet du changement climatique sur la température

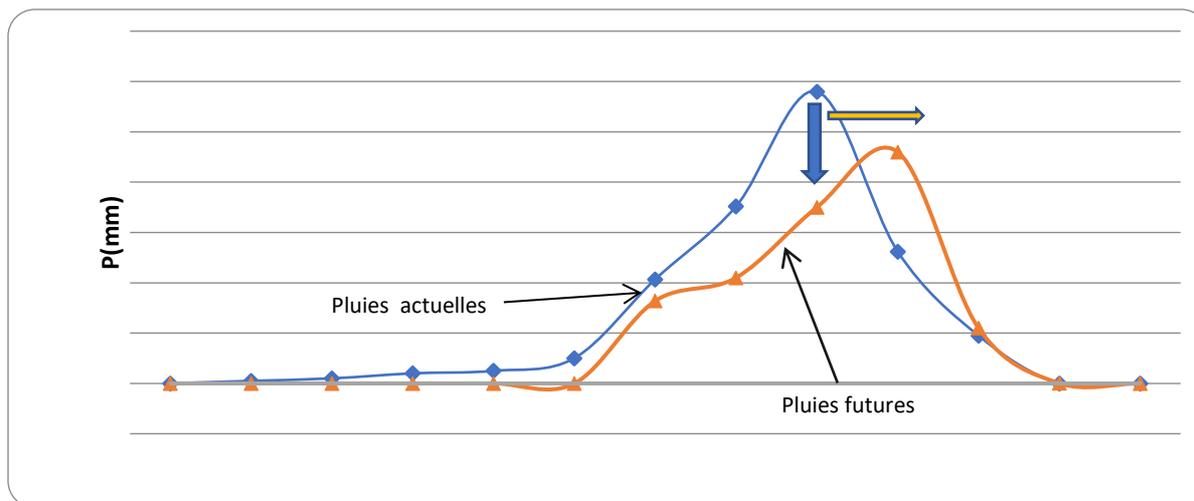


Figure 5: Illustration de l'effet du changement climatique sur la pluviométrie

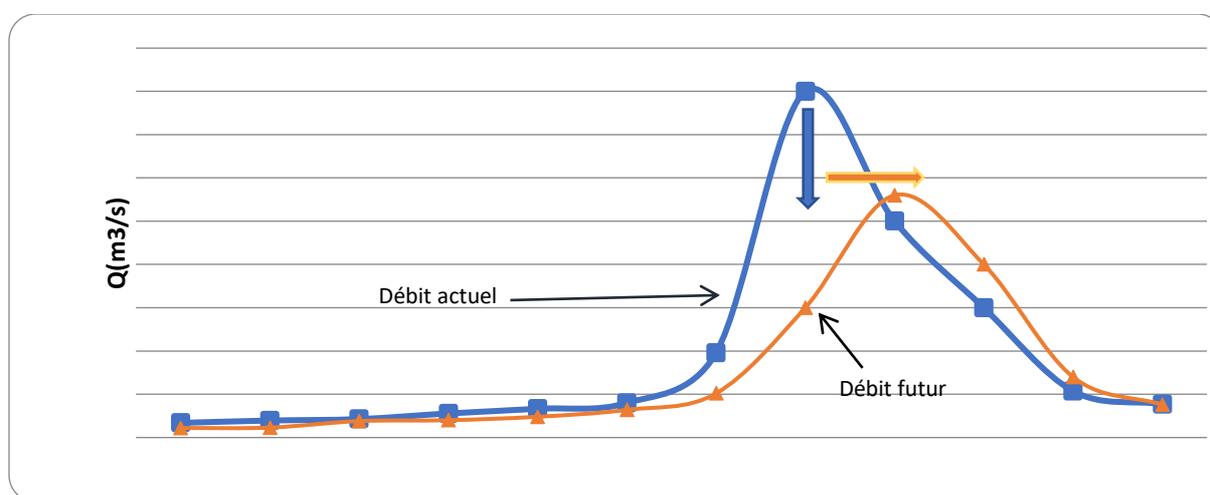


Figure 6 : Illustration de l'effet du changement climatique sur les écoulements

Analyse de causalité

Le changement climatique, tel que défini par la CCNUCC est causé par l'augmentation des émissions des gaz à effets de serres (en particulier le dioxyde de carbone et le méthane), du fait essentiellement de la hausse rapide de la consommation d'énergie fossile (pétrole, charbon), de changement dans les usages des sols, la déforestation, etc. Dans la situation mondiale actuelle où les sources d'énergies et renouvelables sont bien connues et maîtrisées, la persistance de la dépendance aux énergies fossiles s'explique en grande partie par les objectifs d'optimisation du profit et la culture de consommation. Dans les pays en développement, le déboisement et les pratiques d'exploitations non durables des sols s'expliquent en grande partie par la pauvreté et la croissance démographique rapide.

Les conséquences

L'agriculture –surtout l'agriculture pluviale et de décrue– est le secteur le plus vulnérable au changement climatique, aux effets de l'augmentation des températures, à la baisse de la pluviosité et de la fréquence et ampleur de la crue naturelle. Les autres secteurs les plus affectés par le changement climatique sont l'élevage et la pêche. Au total donc, la grande majorité des

habitants du bassin du fleuve Sénégal qui pratiquent l'agriculture traditionnelle, la pêche et l'élevage sont les plus exposés aux impacts négatifs du changement climatique.

Les options de réponses

Les réponses au défi du changement climatique sont de deux ordres : la mitigation et l'adaptation. La mitigation vise l'atténuation du changement climatique, en réduisant les émissions des gaz à effets de serres (dioxyde de carbone, méthane, oxydes d'azote, etc.). La réduction significative des émissions de GES nécessite des efforts soutenus et de grande ampleur au niveau mondial. Bien qu'on attende le plus d'efforts des pays riches et/ou industrialisés qui émettent les plus grandes quantités de GES, les pays riverains du fleuve Sénégal se sont aussi engagés dans le cadre de leurs Communications Nationales à la CCNUCC et récemment dans le cadre de leurs Contributions Nationales Prévues Déterminées (CPDN)¹⁴ de réduire leurs émissions. Mais quels que soient les efforts consentis, les effets sur le changement climatique ne peuvent être avoir d'impacts notables que sur long terme. Les mesures de mitigation ne résolvent donc pas le besoin de réponse à court et moyen terme aux problèmes posés par le changement climatique.

Les efforts de mitigation doivent donc être complétés par des mesures d'adaptation et de renforcement de la résilience. Les mesures d'adaptation sont des actions entreprises pour absorber les manifestations et atténuer les conséquences des changements vécus et ceux prévus. Le renforcement de la résilience vise, à l'échelle systémique, à accroître le niveau de préparation pour absorber les effets du changements climatiques mais aussi pour en saisir les opportunités. Les mesures d'adaptation et de renforcement de la résilience contribuent à la réduction de la vulnérabilité des populations humaines et animales et des écosystèmes au changement climatique, c'est-à-dire au renforcement de leur capacité à anticiper, à résister, à s'adapter aux impacts du changement climatique ou à se remettre de ces impacts (Niasse et al., 2004).

Les actions visant à réduire la vulnérabilité au changement climatique comprennent les mesures centrées sur l'offre ou celles centrées sur la demande. Dans le bassin du fleuve du fleuve Sénégal, la baisse de la disponibilité de l'eau (pluviométrie et écoulements) et la plus grande fréquence des événements extrêmes font partie des effets majeurs du changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal. Les mesures centrées sur l'offre mises en œuvre ou envisagées dans le bassin du fleuve Sénégal incluent par conséquent des interventions telles que la réalisation de barrages et le stockage de l'eau dans des réservoirs, la réalisation de forages pour l'exploitation des eaux souterraines, des interventions ponctuelles de collecte et stockage des eaux de pluie. Les mesures centrées sur la gestion de la demande, actuellement insuffisamment mises en œuvre dans le bassin du fleuve Sénégal peuvent comprendre des interventions telles que l'augmentation de l'utilisation efficiente de l'eau (en particulier l'eau d'irrigation et celle utilisée dans les industries et mines), le recyclage et la réutilisation des eaux usées. A ces mesures peuvent s'ajouter la gestion plus rigoureuse des risques d'inondation, la gestion

¹⁴ Les CPDN, préparées en direction des négociations sur le changement climatique à Paris en décembre 2015, définissent les mesures envisagées au niveau par les différents pour contribuer aux efforts collectifs de réduction des gaz à effet de serre (actions de mitigation) et lutter contre les effets immédiats du changement climatiques (actions d'adaptation).

intégrée et l'amélioration de la gouvernance générale des ressources en eau (Kundzewicz, 2007)¹⁵. Les CPDN et PANA de la Guinée, du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal prennent en compte beaucoup de ces mesures, et en particulier celles liées à des solutions centrées sur l'offre et celles consistant à améliorer la gouvernance des ressources en eau.

Les stratégies d'adaptation conçues par les Etats riverains du fleuve Sénégal ne mettent pas suffisamment en évidence les mesures d'adaptation basées sur les écosystèmes (EBA), c'est-à-dire l'inclusion de l'utilisation de la biodiversité et des services écosystémiques dans les stratégies d'adaptation. Les mesures EBA peuvent inclure la restauration de zones écologiques (y compris zones humides et plaines d'inondation), l'amélioration de la diversité biologique, la reforestation, la lutte contre les feux de brousses, la réglementation de la pêche ou la réalisation de couloirs écologiques (Noble et al., 2014)¹⁶.

Tableau 3: : Matrice d'Impact Environnemental

Problèmes	Symptômes/effets	Causes immédiates	Causes fondamentales	Portée
Changement climatique	<ul style="list-style-type: none"> • Hausse températures moyennes • Baisse pluviométrie • Baisse des écoulements • Baisse niveau statique des aquifères • Plus grande fréquence et ampleur des événements extrêmes (inondations, sécheresses) • Elévation du niveau de la mer 	Emission de gaz à effet de serre Augmentation de la consommation d'énergie fossile Changement dans l'affectation et l'utilisation des sols Pratiques agro-pastorales non durables Déforestation	Culture consumériste ; Urbanisation et émergence de classes moyennes ; Forte dépendance de l'exploitation des matières premières ; Pauvreté rurale.	Ensemble du bassin Zones/secteurs de plus grande vulnérabilité : Agriculture pluviale et de décrue dans la moyenne vallée ; Elevage dans la partie sahélienne du bassin

¹⁵Kundzewicz, Z. W., L. J. Mata, N. W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K. A. Miller, T. Oki, S. Zekai and I. Shiklomanov (2007). Freshwater resources and their management. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson), 173-210. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

¹⁶Noble, I.R., S. Huq, Y.A. et al. 2014: Adaptation needs and options. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 833-86. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap14_FINAL.pdf

Tableau 4 : Matrice des options d'actions prioritaires par pays (accent sur les mesures d'adaptation et résilience)¹⁷

Pays	Actions prioritaires	Types d'action
Guinée	<ul style="list-style-type: none"> • Préservation et restauration des ripisylves des têtes de sources et des berges, en particulier sur les cours d'eau transfrontaliers ; • Promotion de l'agroforesterie • Gestion des feux de brousse et mise en défens. • Promotion d'alternatives aux activités d'usages et de prélèvements qui contribuent à la dégradation des terres et à la baisse de la qualité des eaux (fabriques de briques, dragage des lits pour la recherche de minerais) • Protection et restauration d'écosystèmes fragiles (aires protégées, forêts) • Augmentation des investissements dans la culture irriguée • Promotion de variétés adaptées dans la riziculture irriguée ; • Développement de la pisciculture 	Mise en œuvre du PANA (2007) et de la CPDN (2015) ; Elaboration d'un Plan GIRE sur la base de la Feuille de Route GIRE actuelle.
Mali	<ul style="list-style-type: none"> • Promotion de l'aquaculture • Vulgarisation d'espèces végétales et animales adaptées • Aménagements de bas-fonds • Réalisation de forages équipés à l'énergie solaire • Captage des eaux de ruissellement et restauration des points d'eau (marigot, marres et lacs) • Gestion des feux de brousse • Développement des cultures fourragères • Meilleure utilisation de l'information climatique comme outil d'aide à la décision • Promotion des énergies renouvelables 	Mise en œuvre du PANA (2007) et de la CPDN (2015) ; Réactualisation et mise en œuvre effective du PAGIRE (2007)

¹⁷Les actions indiquées sont dans une large mesure basée sur les plans et stratégies dans les domaines du changement climatique (PANA, CPDN) et de l'eau (PAGIRE) préparés par les Etats riverains du fleuve Sénégal

Mauritanie	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation de bassins de rétention et petits barrages • Aménagement de bassins-versants • Restauration de pâturages naturels/mise en défens et gestion des parcours pastoraux • Développement des cultures fourragères • Réhabilitation/gestion durable des zones humides • Reboisement/restauration des forêts classées • Lutte contre la dégradation des terres 	<p>Mise en œuvre du PANA (2004) et de la CPDN (2015) ; Mise en œuvre de la Stratégie Nationale Zones Humides (2014)</p>
Sénégal	<ul style="list-style-type: none"> • Restauration des écosystèmes côtiers et marins ; • Investissements de maîtrise de l'eau • Réhabilitation de la culture de décrue • Lutte contre la salinisation des terres • Promotion de la GIRE • Gestion durable des terres • Assurance agricole et pastorale 	<p>Mise en œuvre du PANA (2007) et de la CPDN (2015) ; PAGIRE (2011)</p>
Echelle bassin	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la connaissance scientifique sur les effets du changement climatique sur le bassin du fleuve Sénégal ; • Renforcer la sécurité des ouvrages, des biens et des écosystèmes face aux impacts du changement climatique • Renforcer à l'échelle transfrontalières les mesures d'adaptation basée sur les écosystèmes 	<p>Commanditer une étude d'envergure sur les scénarios de changement climatiques et leurs impacts dans le bassin du fleuve Sénégal Mettre à jour les plans de gestion des ouvrages et les plans d'alerte à la lumière des résultats de l'étude sur le changement climatique. Appuyer la mise en place et la gestion de réserves de biosphères transfrontalières (dans le delta et le haut bassin)</p>

Description de la base de données

La description de la base de données avait préalablement été faite dans le cadre du rapport final de la 1^{ère} Phase. La base de données hydrométriques et pluviométriques actualisées des stations du bassin versant du fleuve Sénégal jusqu'en 2016 avait également été fournie. Parallèlement au bassin versant du fleuve Sénégal, une base de données climatiques de 24 stations sur l'échelle du territoire sénégalais a été développée. Ce qui suit constitue donc un rappel de ces éléments déjà disponible et présente également les quelques mises à jour réalisées sur les données.

L'ensemble de la base de données mise à jour sera fournie en format HYDRACESS.

1. RESEAU D'OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

Les observations météorologiques et climatologiques montrent à bien des égards que l'espace OMVS dans son ensemble n'est plus en marge des fluctuations climatiques qui ont pour corollaire l'augmentation des risques de catastrophes naturelles dont les 75 % sont d'origines hydrométéorologiques. Les basculements saisonniers de son climat que nous vivons et de ses conséquences provoquent d'importantes pertes de biens matériels et de vies humaines. Le climat est en train de changer et changera encore. Les études climatologiques ont confirmé certaines informations telles que la hausse de la température dans toutes les stations météorologiques du pays et la baisse vertigineuse de la pluviométrie qui sont des indicateurs pertinents de la dégradation des ressources naturelles.

Les études de vulnérabilité et d'adaptation aux changements climatiques réalisées en Guinée, au Sénégal, au Mali et en Mauritanie indiquent que ces informations susmentionnées, ajoutées à la croissance démographique et l'extrême pauvreté de la population rendent très vulnérables les différentes ressources et groupes socio-économiques aux changements climatiques.

Les risques de sécheresse, de forte insolation, des feux de brousse, d'inondation, de perturbation du régime pluviométrique, etc. ont des conséquences comme la perte de la biodiversité, la baisse des rendements des sols, la pénurie d'eau, la recrudescence des feux de brousse, la mortalité de la microfaune et microflore, la destruction des infrastructures socio-économiques, la prolifération des maladies hydriques, la perturbation du calendrier agricole, etc. Ceci contrecarre la réalisation des objectifs du développement durable. Donc, investir dans l'information sur le climat pour les pays les plus vulnérables est essentiel pour la prévention des catastrophes naturelles, la sécurité alimentaire, la gestion de l'eau et la santé humaine. Pour y faire face, on a besoin d'informations hydrométéorologiques et climatologiques de qualité en vue d'adapter les populations vulnérables aux effets négatifs des changements climatiques. Globalement, le consultant a collecté les données pluviométriques et les données de débits.

2. SITUATION DE REFERENCE DU RESEAU D'OBSERVATIONS

Les archives de la Direction Nationale de la Météorologie indiquent que les premières observations climatiques vers les années 1890 dans le bassin du fleuve Sénégal. Ces observations exclusivement effectuées par les bénévoles (administrateurs, agriculteurs, prêtres, militaires et médecins coloniaux) ont d'abord porté sur la pluviométrie, et plus tard, sur d'autres éléments climatiques tels que la température et l'humidité de l'air.

L'extension du réseau de stations d'observations se fera au gré de l'occupation du territoire du bassin et selon l'intérêt et la disponibilité de l'administration coloniale. C'est à partir de 1920 que l'implantation de véritables stations d'observations météorologiques a commencé.

4. RESEAU DE STATIONS ET DONNEES PLUVIOMETRIQUES DE LA REGION OUEST-AFRICAINE

Une base de données pluviométriques sous-régionale avait déjà été développée dans le cadre du Projet ACEWATER1 ; elle avait servi de base à l'analyse de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest mise en œuvre avec l'outil REFRAN-CV. Cette base de données

Dans le cadre de la présente étude, des données concernant toute la bande sahélienne ont été recueillies à travers les partenariats de recherche entre l'UCAD et d'autres institutions sous régionales.

La figure ci-dessous donne la couverture géographique de ces données. Celles-ci seront mobilisées principalement dans le cadre d'articles scientifiques prévus pour être développés dans les thèmes suivants :

1. Vulnérabilité climatique, variabilité des ressources et actions humaines en Afrique de l'Ouest. Est-il possible de construire un environnement et des communautés résilientes à partir des infrastructures hydrauliques ? Focus sur les grands bassins hydrographiques ouest-africains : Niger, Sénégal et Volta
2. Mise à jour des connaissances sur la variabilité pluviométrique et hydrométrique à l'échelle sous régionale. Vérification des résultats de ACEWATER1

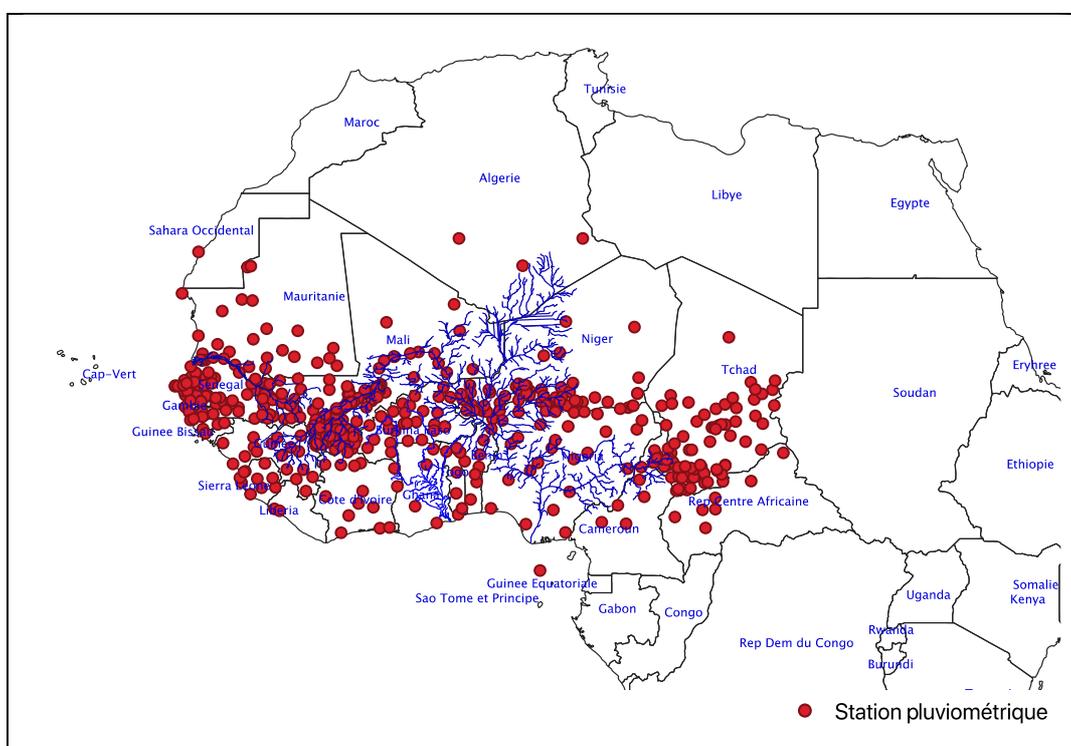


Figure 7 : Réseau d'observations pluviométriques en Afrique de l'Ouest

Références bibliographiques

- ARDOIN-BARDIN (S.), DEZETTER (A.), SERVAT (E.), PATUREL (J.-E.), MAHÉ (G.), NIEL (H.), DIEULIN (C.), 2009. — Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 77-89.
- ARTELIA, Union de Coteba & SOGREAH, 2013. — Aménagement hydroélectrique de Bouréya en Guinée. Étude de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS). OMVS. Dakar, Février.
- BADER (J. C.), 1992. — Étude de l'impact du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du Sénégal au niveau de Bakel. ORSTOM Dakar, Octobre 1992, 49 p.
- BADER (J. C.), 1992. — Calcul de la courbe de remous du barrage de Diama. Le logiciel COREDIAM. Dakar, Mai 1992. OMVS, ORSTOM, 14 p.
- BADER (J. C.), 1992. — Consigne de gestion du barrage à vocation multiple de Manantali. Détermination des cotes limites à respecter dans la retenue. *Hydrol. continent.*, vol. 7, n° 1 ; 1992, pp. 3-12.
- BADER (J. C.), 1997. — Le soutien de crue mobile dans le Fleuve Sénégal, à partir du barrage de Manantali, *Hydrological Sciences Journal*, 42: 6, 815-831, DOI: 10.1080/02626669709492081
- BADER (J. C.), 2001. — Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs Phase III, Manuel de gestion du barrage de Manantali, version finale, OMVS, 110 p.
- BADER (J. C.), 2001. — Programme d'Optimisation de Gestion des Réservoirs : Manuel de gestion du barrage de Diama version révisée pour les conditions d'écoulement prévalant depuis octobre 2003 (ouverture de la brèche dans la langue de Barbarie), OMVS, 52 p.
- BADER (J. C.), CAUCHY (S.), 2013. — Actualisation de la monographie hydrologique du fleuve Sénégal. Rapport final. Février 2013. OMVS, 789 p.
- BÂDER (J. C.), LAMAGAT (J. P.), GUIGUEN (N.), 2003. — Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal : analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Volume 48, n°04, pp.525-538.
- BADER (J.-C.), CAUCHY (S.), DUFFAR (L.), SAURA (P.), 2014. — Monographie hydrologique du fleuve Sénégal. De l'origine des mesures jusqu'en 2011. © IRD, 2014 ISBN: 978-2-7099-1885-5 (http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-01/010065190.pdf)
- BODIAN (A.), DEZETTER (A.), DIOP (L.), 2015. — Évolution des apports en eau au barrage de Manantali à l'horizon 2050. Texte présenté à la Conférence Internationale sur l'Hydrologie des Grands Bassins Fluviaux de l'Afrique. 26-30 Oct. 2015. Hammamet (Tunisie). IRD, INAT, FRIEND-Water.
- BODIAN (A.), DEZZETER (A.), DACOSTA (H.), 2012. — **Apport de la modélisation pluie-débit pour la Connaissance de la ressource en eau : application au Haut bassin du fleuve Sénégal.** *Climatologie*, 9, pp. 109-125.

- BODIAN (A.), 2011. — Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat, Hydrologie Continentale*, EDEQUE/UCAD, 288 p.
- BOINET (E.), 2011. — **La Gestion Intégrée des Ressources en Eau du fleuve Sénégal : bilan et perspectives**. Université Paris Sud XI, Faculté Jean Monnet, 68 p.
- BOIVIN (P.), 1995. — La dégradation des terres irriguées dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. ORSTOM, pp. 239-244.
- CCR, 2019. — Étude sur l'état des lieux des données, des modèles, des systèmes et des infrastructures existantes au niveau de l'OMVS et des partenaires des projets OMVS dans le bassin du fleuve Sénégal – Draft rapport final, 77 p.
- CECCHI (P.), 1992. — Phytoplancton et conditions de milieu dans l'estuaire du fleuve Sénégal : Effets du barrage de Diama. Université de Montpellier II. Sciences et techniques du Languedoc. Thèse de doctorat. 437 p.
- CISSE (M. T.), SAMBOU (S.), DIEME (Y.), DIATTA (C.) & BOP (M.), 2014. — **Analyse des écoulements dans le bassin du fleuve Sénégal de 1960 à 2008**. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27 (2), 167–187. <https://doi.org/10.7202/1025566ar>
- COGELS (F. X.), 1984. — Étude limnologique d'un lac sahélien : le lac de Guiers (Sénégal). Propositions de gestion de l'écosystème lacustre sur base de la connaissance de son fonctionnement hydrologique et hydrogéochimique, de ses potentialités et des impacts des futurs aménagements de la vallée du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat d'État es Sciences de l'Environnement*, Fondation Univ. Luxembourgeoise, Arlon, Belgique, 329 p.
- COYNE & BELLIER, 2005. — Étude d'évaluation des impacts de l'ouverture d'une embouchure artificielle à l'aval de Saint-Louis sur le barrage de Diama. *Rapport final OMVS*, 38 p.
- COYNE & BELLIER, SOGREAH, 1987. — Consignes générales d'exploitation et d'entretien du barrage de Diama, 21 p
- DIAKHATE (M.), 1986. — Le barrage de Diama : essai sur l'évaluation de ses impacts potentiels. *In : Revue de géographie de Lyon*. Vol. 61 n°1, 1986. pp. 43-61. doi : 10.3406/geoca.1986.4075 http://www.persee.fr/web/revues/prescript/article/geoca_0035-113X_1986_num_61_1_4075
- DIAKHATE (M.), 1988. — Ecodynamique des milieux et effets d'impact potentiels du barrage de Diama dans le delta du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat*, Univ. Lumière Lyon II, 401 p. + annexes.
- EQUESEN, 1993. — Rapport de synthèse du projet EQUESEN (Environnement et Qualité des Eaux du fleuve Sénégal). *Rapport ORSTOM multigr.*, Dakar et *rapport CEE (EQUESEN)*, TS 2 0198 F EDB, 6 tomes.
- FATY (A.), 2019. — Modélisation Hydrologique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité hydro-climatique : Apport de la télédétection et du modèle MIKE SHE. *Thèse de doctorat unique, Hydrologie Continentale*, EDEQUE/UCAD, 261 p.
- FRICATIER (Y.), NIASSE (M.), 2008. — *Volet social et environnemental du barrage de Manantali : Évaluation rétrospective*. Agence française de développement, Paris

coll. « Évaluation et capitalisation » (n°15), 69 p. URL : <http://afd.fr/webdav/site/afd/shared/PUBLICATIONS/RECHERCHE/Evaluations/Evaluation-capitalisation.pdf>

GAC (J. Y.), CARN (M.), SAOS (J. L.), 1986 a. — L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal : I.- Période 1903-1980. *Rev. Hydrobio. Trop.*, 19, (1), pp. 3-17.

GAC (J. Y.), CARN (M.), SAOS (J. L.), 1986 b. — L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal : II.- Période 1980-1983, proposition d'un nouveau modèle d'intrusion continentale des eaux océaniques. *Revue Hydrobiologie Tropicale*, 19 (2), pp. 93-108.

GAC (J. Y.), FAURE (H.), 1987. — Le « vrai » retour à l'humide au Sahel est-il pour demain ? *C. R. Acad. Sci.*, Paris, tome 305., série II, pp. 777-781.

GAC (J. Y.), KANE (A.), 1986 a. — Le fleuve Sénégal : I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Sciences géologiques. Bull.* 39(1): 99-130.

GAC (J. Y.), KANE (A.), 1986 b. — Le fleuve Sénégal. II. Bilan hydrique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Sciences Géologiques* 39, 151-172.

GAC (J.-Y.), COGELS (F.-X.), KANE (A.), SAOS (J.-L.), CARN (M.) *et al.*, 1995. — EQUÉSEN (Environnement et qualité des eaux du Sénégal) : Rapport final. *Dakar : ORSTOM, 1993, 6 tomes + rapports annexes*

GAUTRON (J. C.), 1967. — L'aménagement du bassin du fleuve Sénégal. In: *Annuaire français de droit international*, volume 13, 1967. pp. 690-702.

GAYE (A. T.), NDIAYE (O.), s.d. — Élaboration de scénarios climatiques dans le cadre volet adaptation de la Contribution Prévue Déterminée au niveau National (CPDN) 2015. DEEC. Sénégal.

IRD-OMVS, 2001. — Manuel de gestion du barrage de Diama. Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs, 59 p.

IRD-OMVS, 2004. — Manuel de gestion du barrage de Diama. Version révisée pour les conditions d'écoulement prévalant depuis octobre 2003 (ouverture de la brèche dans la langue de barbarie), 52 p.

KANE (A.), 1985. — Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particulaires. Invasion marine dans la vallée du fleuve. Contribution à l'hydrologie fluviale en milieu tropical humide et à la dynamique estuarienne en domaine sahélien. *Thèse doctorat 3^{ème} cycle*, Univ. Nancy II, 205 p.

KANE (A.), 1997. — L'après barrage dans la vallée du fleuve Sénégal : Modifications hydrologiques, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu naturel et les aménagements hydro-agricoles. *Thèse de doctorat d'Etat de Géographie physique*, UCAD, 551 p.

KANE (A.), NIANG (A.), 2009. — Coastal environment and Vulnerability Studies in the North of Senegal. Communication orale, Colloquium « Research and Formation in Oceanography in

West African Universities » associated with the 6th « International Workshop on Contemporary Problems in Mathematical Physics », Cotonou, November 2 - 6, 2009.

KUNDZEWICZ (Z. W.), MATA (L. J.), ARNELL (N. W.), DÖLL (P.), KABAT (P.), JIMÉNEZ (B.), MILLER (K. A.), OKI (T.), ZEKAI (S.) and SHIKLOMANOV (I.), 2007. — Freshwater resources and their management. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson), 173-210. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

LAMAGAT (J. P.), BADER (J. C.), 2003. — Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal. Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la Gestion Intégrée de l'Eau au Sein d'un Bassin Versant, 2003, Montpellier, France. 14 p. cirad-00178260

MAÏGA (M.), 1995. — Le fleuve Sénégal et l'intégration de l'Afrique de l'Ouest en 2011. *CODESRIA, Kharthala*, 243 p.

MBAYE (M. L.), HAGEMANN (S.), HAENSLER (A.), STACKE (T.), GAYE (A. T.) AND AFOUDA (A.), 2015. — **Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in the Upper Senegal Basin (West Africa)**. *American Journal of Climate Change*, 4, 77-93. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2015.41008>

MET (RM), 2007. — Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques. Ministère de l'Équipement et des Transports (MET)/Direction Nationale de la Météorologie. Bamako. Juillet 2007.

MEUBLAT (G.), INGLES (J.), 1995. — L'éternel retour d'une politique de grands projets : L'aménagement du fleuve Sénégal en perspective. Pp. 164-199

MICHEL (P.), 1973. — Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. *Mémoires ORSTOM N°63*, 3 tomes, 752 p.

Nations Unies, 1992. — Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique. New York. Accessible à : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>

NDIAYE (E. M.), 2003. — Le fleuve Sénégal et les barrages de l'OMVS : quels enseignements pour la mise en œuvre du NEPAD ? », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]*, Volume 4 Numéro 3 | décembre 2003, mis en ligne le 01 décembre 2003, consulté le 20 décembre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/3883> ; DOI: 10.4000/vertigo.3883, 8 p.

NIASSE (M.), AFOUDA (A.), AMANI (A.), 2004. — Réduire la vulnérabilité en Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation, UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni. Xviii + 77 p.

OMVS, 1996. — Synthèse des évaluations environnementales et orientations quant à la réalisation du projet. Haut-Commissariat, Projet Energie Manantali. 51 p.

- OMVS, 1997. — PASIE : Programme d'Atténuation et de Suivi des Impacts sur l'Environnement - COB / FITCHNER / TECHSULT, Juin 1997
- OMVS, 1997. — Programme d'atténuation et de suivi des impacts sur l'environnement (PASIE). Projet Énergie Manantali. *Version finale*, 109 p.
- OMVS, 2000. — Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs (POGR) - Volet : analyse coûts-bénéfices. Simulation et choix des scénarios (Dossier de synthèse) - SCP / C&B / SENAGROSOL.
- OMVS, 2002. — Charte des eaux du Fleuve Sénégal, Mai 2002, Texte réglementaire, 19 pages + annexes.
- OMVS, 2002. — Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs (POGR) : Rapports et programmes de simulation des barrages, Phase finale, IRD – Février 2002.
- OMVS, 2006. — Appui à la gestion des eaux du Fleuve Sénégal - Tableau de Bord de Gestion de la ressource en eau du Fleuve Sénégal : rapport de phase III - Tableau de bord niveau II - Version définitive - CG/ COB/ SIEE, Décembre 2006, 103 pages
- OMVS, 2006. — Étude des impacts environnementaux du projet d'aménagement de Félou. Rapport d'EIE. S.A. AGRER N.V. Mali, 155 p.
- OMVS, 2010. — SDAGE du Fleuve Sénégal - Phase 3 : Schéma Directeur (Version finale) - CG/SCP/CSE – Décembre 2010
- OMVS, 2011. — Étude d'actualisation de la Monographie du fleuve Sénégal et d'évaluation des inondations dans la vallée du Fleuve Sénégal - 2ème partie : Évaluation des crues du fleuve Sénégal (Rapport d'étape) - SCP/IRD/Idev – Juillet 2011
- OMVS, 2013. — Actualisation du cadre de politique de réinstallation (CPR). Projet de Gestion Intégrée des Ressources en Eau et de Développement des Usages Multiples du Bassin du fleuve Sénégal (PGIRE) - Phase 2 du Programme (PGIRE, FEM, TF, PDS et PDRI). Rapport final. 206 p.
- OMVS, 2017. — Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du Fleuve Sénégal, février 2017
- OMVS, 2017. — Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problème Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal 2017-2037, Février 2017
- OMVS, 2018. — PGIRE, Évaluation de la vulnérabilité du Bassin du Fleuve Sénégal face aux changements climatiques et élaboration d'un plan pour l'adaptation et le renforcement de la résilience du bassin, ainsi que l'actualisation des modèles de gestion des ressources hydriques utilisés par l'OMVS, R2- Rapport de diagnostic d'évaluation de la vulnérabilité – version finale, avril 2018
- OMVS, 2018. — Projet d'Appui à la gestion des ressources en eau et du Nexus eau-énergie-agriculture dans le Bassin du Fleuve Sénégal. Compte rendu 2ème Atelier Technique : Données, Méthodes et Modèles. Dakar, Sénégal, 40 p.

OMVS, 2018. — Projet d'Appui à la gestion des ressources en eau et du Nexus eau-énergie-agriculture dans le Bassin du Fleuve Sénégal. Compte rendu 1ère Réunion Technique du Comité Consultatif. 30 p.

OMVS/OMM, 2007. — SENEGAL-HYCOS : Renforcement des capacités nationales et régionales d'observation, transmission et traitement de données pour contribuer au développement durable du bassin du Fleuve Sénégal. Document de projet préliminaire, 53 p.

OULD MERZOUG (M. S.), 2005. — L'eau, l'Afrique, la solidarité : une nouvelle espérance : l'OMVS, un cas de développement solidaire. *Présence africaine*, Paris, 2005, 189 p.

OYEBANDE (L.), KANE (A.) NIANG (A.), KONATE (L.), BA (S.), 2008. — Freshwater under threat. Vulnerability Assessment of Freshwater Resources to Environmental Change. *Chapter 6: Western Africa*. UNEP-WRC/AMCOW. 319 p.

OYEBANDE (L.), KANE (A.), NIANG (A.), KONATE (L.), BA (S.), 2006. — Rapid assessment of the Water Resources in Africa Phase II : Bassins des fleuve Gambie, Mano River et aquifères sénégal-mauritanien. Sous la direction de Lekan Oyebande et Pr Alioune Kane, PNUE, 35 p. multigr.

ROCHETTE (C.), 1974. — Le bassin du Fleuve Sénégal. Monographies hydrologiques. Orstom, 391 p. *Doc. multigr.*

SALMAN (M.), CASAROTTO (C.), TILMANT (A.) and PIÑA (J.), 2018. - Hydro-economic modelling for basin management of the Senegal River. Rapport FAO, Rome, 16 p.

SOUSSOU SAMBOU, BOYE (M.), BADJI (A. M.), MALANDA-NIMY (E. N.), BODIAN (A.), KURUMA (M.), MARIKO (A.), BAMBA (F.), DACOSTA (H.), MALOU (R.), BARRY (A.), KANE (A.), FALL NIANG (A.), SOUMARE (H.), 2011. — Calage et validation des modèles hydrologiques GR4J et GR4M sur le bassin du Bafing en amont du Bafing-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manantali. Communication orale, 6^{ème} Edition des Journées Scientifiques du 2iE, Campus 2iE Ouagadougou, 4-8 avril 2011, 6 p.

SENEGAL-HYCOS, 2012. — Une composante du Système Mondial d'Observation du Cycle Hydrologique (WHYCOS). Document de projet. Lyon, 110 p.

SOW (A. A.), 1984. — Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat de 3^e cycle*, Univ. Nancy II, 435 p.

SULLIVAN (C.), MEIGH (J.) and M. ACREMAN (M.), 2002. — Scoping Study on the Identification of Hot Spots – Areas of high vulnerability to climatic variability and change identified using a Climate Vulnerability Index. Report to Dialogue on Water and Climate. Centre for Ecology and Hydrology (CEH). Wallingford, United Kingdom

TRACTEBEL ENginerIn, GDF Suez & Coyne et Bellier. 2012. — Projet hydroélectrique de Koukoutamba. Avant-projet détaillé (APD). Chap. C1. Hydrologie :

VAN LAVIEREN (B.), VAN WETTEN (J.), 1988. – Profil de l'environnement de la vallée du fleuve Sénégal. Direction Générale de la Coopération au Développement (DGIS). Pays Bas, 159 p.

VAN LAVIEREN (B.), VAN WETTEN (J.), 1990. — Profil environnemental de la vallée du fleuve Sénégal. EUROCONSULT/RIN, 68 p.

Annexes

ANNEXE 1 : BASE DE DONNÉES CLIMATIQUES DE LA RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL (MÉTADONNÉES)

CODE_STATION	STATION_NAME	TYPE	LAT. NORTH	LONG. WEST	Starting year	Period	Average rainfall (mm)	Temperature (Min & Max)	Moisture (Min & Max)	Evaporation
1380000400	BAKEL	P	14° 54'	12° 28'	1918	1918-2016	527,8	1979-2016	1982-2016	1981-2016
1380001000	BAMBEY	S	14° 42'	16° 28'	1921	1921-2016	582,4	1987-2016	1987-2016	1981-2016
1380002700	CAP SKIRING	S	12° 24'	16° 45'	1977	1977-2016	1 217,6	1978-2016	1980-2016	1980-2016
1380000100	DAKAR YOFF	S	14° 44'	17° 30'	1897	1897-2016	541,7	1960-2016	1960-2016	1960-2016
1380006400	DIOURBEL	S	14° 39'	16° 14'	1919	1919-2016	555,5	1960-2016	1970-2016	1961-2016
1380007600	FATICK	S	12° 41'	16° 25'	1918	1918-2016	680,9	1991-2016	1991-2016	1991-2016
1380009400	GOUDIRY	P	14° 11'	12° 43'	1918	1918-2016	685,0	-	-	-
1380011800	KAOLACK	S	14° 08'	16° 04'	1960	1960-2016	707,9	1960-2016	1960-2016	1961-2016
1380012400	KEDOUGOU	C	12° 34'	12° 11'	1918	1918-2016	1 251,2	1960-2016	1970-2016	1970-2016
1380013300	KOLDA	S	12° 53'	14° 58'	1922	1922-2016	1 124,5	1987-2016	1987-2016	1987-2016
1380014200	KOUNGHEUL	P	12° 37'	16° 21'	1932	1932-2016	776,8	-	-	-
1380015100	LINGUERE	S	15° 23'	15° 7'	1933	1933-2016	446,7	1960-2016	1978-2016	1980-2016
1380015400	LOUGA	C	15° 37'	16° 13'	1919	1919-2016	372,7	1963-2016	1980-2016	1971-2016
1380016300	MATAM	S	15° 39'	13° 15'	1918	1918-2016	442,0	1960-2016	1960-2016	1960-2016
1380018100	MBOUR	P	12° 36'	16° 20'	1931	1931-2016	639,4	1980-2016	1980-2016	1980-2016
1380019900	NIRO DU RIP	P	13° 44'	15° 47'	1980	1980-2016	818,6	1987-2016	1989-2016	1987-2016
1380021400	PODOR	S	16° 39'	14° 58'	1918	1918-2016	272,8	1960-2016	1970-2016	1981-2016
1380021700	RANEROU	P	15° 18'	13° 58'	1963	1963-2016	446,4	-	-	-
1380023200	SAINT-LOUIS AERO	S	16° 03'	16° 27'	1957	1960-2016	265,6	1980-2015	1980-2015	1981-2015
1380024900	SIMENTI	P	13° 03'	13° 18'	1968	1968-2014	894,7	1995-2014	1995-2014	-
1380025300	TAMBACOUNDA	S	13° 46'	13° 41'	1919	1919-2016	815,5	1960-2016	1960-2016	1960-2016
1380026500	THIES	S	14° 48'	16° 57'	1918	1918-2016	550,5	1977-2016	1977-2016	1977-2016
1380028000	VELINGARA FERLO	P	15° 0'	14° 41'	1945	1945-2016	715,3	1984-2016	1985-2016	1984-2016
1380028600	ZIGUINCHOR	S	12° 33'	16° 16'	1918	1918-2016	1 418,7	1951-2016	1960-2016	1981-2016

ANNEXE 2 : BASE DE DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES DU BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL (MÉTADONNÉES)

ID STATION	STATION NAME	TYPE	Country	LAT. NORD	LONG. OUEST	ALTITUDE (meters)	Starting Date	Available data	Average rainfall (mm)
1170317000	DABOLA	C	Guinea	10°45'	-11°07'	438	1923	1923-1990 / 1995-2014	-
1170320000	DALABA	C	Guinea	10°42'	-12°15'	1202	1933	1933-2014	1942,82
1170335000	DINGUIRAYE	C	Guinea	11°18'	-10°43'	490	1954	1995-2014	1340,31
1170406500	FARANAH	S	Guinea	10°02'	-10°45'	467	1923	1995-2006	1587,72
1170435000	GAOUAL	C	Guinea	11°45'	-13°12'	100	1925	1926-1978	1886,29
1170524000	KANKAN	S	Guinea	10°23'	-09°18'	377	1921	1921-2015	1548,72
1170537000	KINDIA	S	Guinea	10°03'	-12°52'	458	1921	1922-1996	2023,989
1170587000	LABE	S	Guinea	11°19'	-12°18'	1050	1923	1923-1992 / 1995-2015	1619,21
1170617000	MALI	P	Guinea	12°05'	-12°18'	1464	1922	1995-2016	1564,54
1170618000	MAMOU	C	Guinea	10°22'	-12°05'	782	1921	1922-2016	1860,13
1170720000	PITA	P	Guinea	11°04'	-12°24'	965	1922	1925-1990 / 1998-2016	1658,54
1170768000	SIGUIRI	S	Guinea	11°26'	-09°10'	362	1923	1923-2015	1266,22
1170842000	TOUGUE	C	Guinea	11°26'	-11°40'	868	1930	1951-1991 / 1995-2014	1510,74
1170971500	YOUKOUNKOUN	C	Guinea	12°32'	-13°07'	83	1923	1928-1977	1313,04
1270000400	AMBIDEDI	P	Mali	14°35'	-11°47'	30	1951	1951-1986 / 1995-2015	656,543
1270001000	AOUROU	P	Mali	14°58'	-11°35'	65	1951	1951-1989	492,805
1270001600	BAFING-MAKANA	P	Mali	12°33'	-10°15'	239	1960	1960-2014	1174,05
1270001900	BAFOULABE	C	Mali	13°48'	-10°50'	104	1921	1931-2014	886,452
1270002500	BALLE	P	Mali	15°20'	-08°35'	285	1953	1951-2015	470,481
1270000100	BAMAKO-SENOU	S	Mali	12°38'	-08°02'	332	1919	1919-2014	1021,99
1270003700	BANAMBA	P	Mali	13°33'	-07°27'	380	1933	1933-1994	732,838
1270004500	BANGASSI	P	Mali	13°10'	-08°55'	320	1951	1951-1956	665,417
1270005500	BATIMAKANA	P	Mali	13°15'	-09°23'	319	1963	1963-1979	761,322
1270007600	BOUGOUNI	C	Mali	11°25'	-07°30'	353	1921	1921-1995	1147,89
1270008800	DIAMOU	P	Mali	14°06'	-11°16'	60	1950	1950-2015	708,962
1270009100	DIEMA	P	Mali	14°33'	-09°11'	252	1941	1941-2015	600,829

ID_STATION	STATION NAME	TYPE	Country	LAT. NORD	LONG. OUEST	ALTITUDE (meters)	Starting Date	Available data	Average rainfall (mm)
1270012400	FALADYE	C	Mali	13°08'	-08°20'	337	1931	1931-2014	875,739
1270012700	FALEA	P	Mali	12°16'	-11°17'	455	1950	1951-2014	1175,24
1270014200	GALOUGO	P	Mali	13°51'	-11°03'	91	1950	1950-2014	848,797
1270015100	GOUALALA	P	Mali	11°13'	-08°14'	350	1945	1945-2001	1211,1
1270015700	GOURBASSI	P	Mali	13°24'	-11°38'	79	1950	1950-2014	819,898
1270016300	GUENE-GORE	P	Mali	12°44'	-11°02'	240	1950	1950-2014	1251,14
1270018700	KALANA	P	Mali	10°47'	-08°12'	379	1950	1950-2000	1331,87
1270019300	KANGABA	P	Mali	11°56'	-08°25'	370	1939	1939-2002	1073,72
1270020800	KAYES	S	Mali	14°26'	-11°26'	43	1921	1895-2014	663,457
1270021700	KENIEBA	S	Mali	12°50'	-11°14'	150	1942	1942-2014	1143,74
1270022900	KITA	S	Mali	13°05'	-09°29'	332	1931	1930-2014	1001,01
1270023800	KOLOKANI	P	Mali	13°40'	-08°02'	390	1923	1923-2014	765,427
1270024700	KONIAKARI	P	Mali	14°35'	-10°54'	81	1955	1955-2014	673,353
1270026800	KOTERA	P	Mali	14°46'	-12°10'	27	1959	1959-1978	448,429
1270027700	KOUROUNINKOTO	P	Mali	13°51'	-09°35'	267	1951	1950-1990	818,341
1270028000	KOUSSANE	P	Mali	14°53'	-11°14'	96	1959	1951-1993	574,283
1270028600	LEYA	P	Mali	15°06'	-11°50'	52	1959	1968-1969	462,00
1270032200	MOURDIAH	P	Mali	14°28'	-07°28'	314	1930	1930-1988	509,829
1270032800	NARA	P	Mali	15°10'	-07°17'	265	1921	1921-2014	454,411
1270033100	NARENA	P	Mali	12°13'	-08°38'	380	1964	1968-1978	1082,2
1270033700	NEGALA	P	Mali	12°52'	-08°27'	350	1954	1954-1982	989,862
1270034900	NIENEBALE	P	Mali	12°54'	-07°30'	290	1923	1950-1980	853,214
1270035800	NIORO-SAHEL	S	Mali	15°14'	-09°36'	225	1919	1919-2014	565,326
1270036700	OUALIA	P	Mali	13°36'	-10°23'	130	1959	1954-2014	832,492
1270037600	OULOUMA	P	Mali	14°12'	-11°35'	173	1951	1951-1975	840,048
1270037900	OUSSOUBIDIAGNA	P	Mali	14°15'	-10°28'	259	1951	1951-1991	787,644
1270038500	SABOUCIRE	P	Mali	14°18'	-11°17'	50	1960	1963-1966	733,5

ID_STATION	STATION NAME	TYPE	Country	LAT. NORD	LONG. OUEST	ALTITUDE (meters)	Starting Date	Available data	Average rainfall (mm)
1270038800	SADIOLA	P	Mali	13°54'	-11°42'	120	1959	1950-2014	805,597
1270039100	SAGABARI	P	Mali	12°36'	-09°48'	322	1959	1950-2014	1084,23
1270040300	SANDARE	P	Mali	14°43'	-10°18'	281	1954	1954-1979	721,913
1270041200	SEBEKORO	P	Mali	12°58'	-08°59'	360	1951	1968-1978	752,859
1270042400	SIRAKORO	P	Mali	12°41'	-09°14'	369	1951	1950-1998	1029,51
1270046300	TOUKOTO	P	Mali	13°27'	-09°53'	177	1932	1932-2014	796,857
1270047200	YELIMANE	P	Mali	15°08'	-10°34'	97	1919	1919-2014	582,893
1300201000	ACHRAM SONADER	P	Mauritania	17°21'	-12°24'	-	1984	1984-1996	815,231
1300000200	ADEL BOGROU	P	Mauritania	15°35'	-07°00'	200	1978	1988-1996	823,636
1300000600	AIN-FARBA	P	Mauritania	15°56'	-10°23'	226	1978	1979-1980	278,3
1300000400	AIOUN-EL ATROUSS	S	Mauritania	16°44'	-09°38'	223	1946	1946-1998	835,695
1300001000	ALEG	C	Mauritania	17°03'	-13°55'	45	1920	1921-2014	263,367
1300001100	AMOURJ	P	Mauritania	16°06'	-07°13'	280	1967	1967-1996	744,173
1300001200	AOUEINATT ZBEL	P	Mauritania	16°23'	-08°54'	200	1979	1978-1996	188
1300001400	BABABE	P	Mauritania	16°21'	-13°58'	82	1979	1979-1996	710,791
1300001700	BARKEOL	P	Mauritania	16°38'	-12°30'	200	1978	1980	-
1300002000	BELOUGUE LITHAMA	P	Mauritania	15°41'	-12°45'	-	1979	-	-
1300001600	BOGHE	S	Mauritania	16° 34'	-14° 17'	11	1919	1919-2014	280,656
1300002100	BOUMDEID	P	Mauritania	17°26'	-11°21'	200	1980	1980-1996	148,063
1300285500	BOUSTEILA	P	Mauritania	15°35'	-08°05'	-	1980	1980-1996	273,125
1300001900	BOUTILIMIT	S	Mauritania	17°31'	-14°40'	77	1921	1921-2014	182,28
1300344000	DAFORT	P	Mauritania	15°35'	-01°29'	68	1980	1980	-
1300002300	DAR EL BARKA	P	Mauritania	16°41'	-14°41'	8	1971	1969-1974	227,5
1300002600	DIONABA	P	Mauritania	17°38'	-12°26'	-	1980	1980-1996	166,857
1300002700	DJADJIBINE	P	Mauritania	15°45'	-12°29'	-	1979	1980	-
1300002400	DJIGUENI	P	Mauritania	15°44'	-08°40'	222	1971	1971-1996	328,52
1300438000	FOUM-GLEITA	A	Mauritania	16°10'	-12°40'	-	1979	1986-1996	190,25

ID_STATION	STATION NAME	TYPE	Country	LAT. NORD	LONG. OUEST	ALTITUDE (meters)	Starting Date	Available data	Average rainfall (mm)
1300003000	GORFA AVAL	P	Mauritania	15°31'	-12°42'	-	1980	1980	
1300456500	GUEROU	P	Mauritania	16°48'	-11°50'	200	1978	1978-1996	179,882
1300003100	KAEDI	C	Mauritania	16°09'	-13°30'	33	1905	1906-2014	342,695
1300003200	KAEDI-IRAT	C	Mauritania	16°09'	-13°30'	33	1905	1950-1996	331,182
	KAEDI-OMVS		Mauritania	16°08'	-13°31'	33	1905	1905-1913/1930-2014	380,435
1300003400	KANKOSSA	C	Mauritania	15°57'	-11°30'	70	1954	1950-1996	358,652
1300543500	KEUR MACENE	A	Mauritania	16°33'	-16°14'	-	1976	1977-2009	168,968
1300003700	KIFFA	S	Mauritania	16°38'	-11°24'	115	1922	1922-2018	338,229
1300003900	KOUBENI	P	Mauritania	15°48'	-09°25'	274	1979	1979-1996	277,765
1300583000	LEXEIBA	P	Mauritania	16°13'	-01°38'	-	1979	1988-1996	226,714
1300595000	M'BAGNE	P	Mauritania	16°09'	-13°47'	15	1979	1979-1996	234,824
1300004000	M'BOUT	C	Mauritania	16°02'	-12°35'	44	1921	1921-1996	360,422
1300004100	MAGHAMA	P	Mauritania	15°31'	-12°51'	21	1979	1979-1996	308,589
1300004200	MAGTA-LAHJAR	P	Mauritania	17°31'	-13°06'	53	1978	1978-1996	160,824
1300004300	MEDERDRA	P	Mauritania	16°55'	-15°40'	25	1930	1931-1996	219,547
1300004500	MONGUEL	P	Mauritania	16°26'	-13°10'	43	1979	1979-1996	232,188
1300004600	MOUDJERIA	C	Mauritania	17°56'	-12°21'	300	1905	1911-1996	194,203
1300596000	N'BEIKA	C	Mauritania	17°59'	-12°16'	-	1980	1979-1996	370,2
1300004900	NEMA	S	Mauritania	16°37'	-07°16'	269	1922	1922-2018	251,496
1300740000	OULD-YENGE	P	Mauritania	15°32'	-11°43'	57	1979	1979-1996	370,2
1300005800	ROSSO	C	Mauritania	16°30'	-15°49'	5	1934	1934-2018	258,532
1300006100	SELIBABY	S	Mauritania	15°13'	-12°10'	60	1933	1933-2014	552,407
1300006400	TAMCHAKETT	P	Mauritania	17°16'	-10°40'	190	1933	1933-1996	213,742
1300910000	TEKANE	P	Mauritania	16°36'	-15°22'	-	1980	1990-2009	178,737
1300007000	TIDJIKJA	S	Mauritania	18°34'	-11°25'	396	1921	1907-1998	130,182
1300007300	TIMBEDRA	P	Mauritania	16°17'	-08°12'	210	1950	1929-1996	298,791
1300007200	TINTANE	P	Mauritania	16°23'	-10°10'	183	1971	1971-1996	235,792

ID_STATION	STATION NAME	TYPE	Country	LAT. NORD	LONG. OUEST	ALTITUDE (meters)	Starting Date	Available data	Average rainfall (mm)
1300007400	TOUIL	P	Mauritania	15°31'	-10°08'	274	1978	1978-1996	332,444
1300010000	ZRAVIA	P	Mauritania	16°18'	-16°32'	396	1977	1978-2009	104,52
1380010000	AERE LAO	P	Senegal	16° 24'	-14° 19'	11	1962	1962-2014	171
1380000400	BAKEL	C	Senegal	14°54'	-12°27'	25	1918	1918-2016	528
1380001300	BARKEDJI	P	Senegal	15° 17'	-14° 52'	15	1947	1947-2004	417
1380002200	BOKI DIAVE	P	Senegal	15° 53'	-13° 29'	16	1961	1967-1994	311
1380002800	COKI	P	Senegal	15° 31'	-16° 0'	43	1933	1933-2010	387
1380003100	DAGANA	P	Senegal	16° 31'	-15° 30'	5	1918	1918-2014	264
1380003400	DAHRA	P	Senegal	15° 20'	-15° 29'	39	1933	1933-2010	427
1380003500	DAHRA ELEVAGE	P	Senegal	15° 20'	-15° 27'		1956	1956-1994	373
1380004900	DIAGLE	P	Senegal	16° 13'	-15° 42'	18	1962	1962-1986	263
1380007300	FANAYE DIERI	P	Senegal	16° 32'	-15° 13'	10	1961	1962-2014	195
1380009400	GOUDIRY	P	Senegal	14° 11'	-12° 43'	59	1940	1940-2016	687
1380011500	KANEL	P	Senegal	15° 30'	-13° 10'	20	1963	1963-2004	401
1380012400	KEDOUGOU	C	Senegal	12°34'	-12°11'	122	1918	1918-2016	1251
1380012700	KEUR MOMAR SARR	P	Senegal	15° 56'	-15° 58'	15	1962	1962-2004	294
1380013000	KIDIRA	P	Senegal	14°28'	-12°13'	35	1918	1918-2014	649
1380015100	LINGUERE	S	Senegal	15° 23'	-15° 7'	20	1933	1933-2016	453
1380015400	LOUGA	C	Senegal	15° 37'	-16° 13'	38	1887	1919-2016	368
1380016300	MATAM	S	Senegal	15° 39'	-13° 15'	15	1918	1918-2016	446
1380019000	MPAL	P	Senegal	15° 55'	-16° 16'	10	1961	1961-2012	273
1380019200	NAMARY	P	Senegal	15°05'	-13°39'	33	1940	1940-1964	729
1380019300	NDIOUM	P	Senegal	16° 31'	-14° 39'	8	1962	1963-1968/1970-1977 /1992-2013	244
1380020200	OGO	P	Senegal	15° 32'	-13° 18'	17	1966	1967-1970 / 2003-2004	313
1380020400	OUIROSSOGUI	P	Senegal	15° 38'	-13° 18'	-	1966	1970/2000-2004	384
1380760300	PETE	P	Senegal	16° 50'	-13° 56'		1976	1976-2014	255
1380021400	PODOR	S	Senegal	16° 39'	-14° 58'	6	1904	1918-2016	270

ID_STATION	STATION NAME	TYPE	Country	LAT. NORD	LONG. OUEST	ALTITUDE (meters)	Starting Date	Available data	Average rainfall (mm)
1380021700	RANEROU	P	Senegal	15° 18'	-13° 58'	33	1963	1964-2016	425
1380022000	RICHARD-TOLL	C	Senegal	16° 27'	-15° 42'	4	1905	1963-2014	187
1380925600	ROSS-BETHIO	P	Senegal	16°16' N	16°08' W		1975	1975-2010	371,0
1380022800	SAGATTA LINGUERE	P	Senegal	15° 13'	-15° 34'		1933	1935-1959	529
1380022900	SAGATTA LOUGA	P	Senegal	15° 17'	-16° 11'	41	1946	1946-2000	451
1380023200	SAINT-LOUIS AERO	S	Senegal	16° 03'	-16° 27'	4	1957	1957-2012	271
1380023300	SAINT-LOUIS VILLE	P	Senegal	16° 01'	-16° 30'	4	1848	1851-2016	354
1380023500	SALDE	P	Senegal	16° 10'	-13° 53'	11	1961	1962-2014	110
1380023800	SARAYA	P	Senegal	12°50'	-11°45'	186	1948	1949-2014	1101
1380025300	TAMBACOUNDA	S	Senegal	13° 46'	-13° 41'	49	1919	1920-2016	819
1380028000	VELINGARA FERLO	P	Senegal	15° 0'	-14° 41'	25	1956	1946-1980	465
1380929800	YANG-YANG	P	Senegal	15° 39'	-15° 21'	28	1918	1918-1981	465

ANNEXE 3 : BASE DE DONNÉES HYDROLOGIQUES DU BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL (MÉTADONNÉES)

STATION NAME	TYPE	Country	LAT. NORD	LONG. OUEST	Starting Date	Available data	Average flow (mm)
Soukoutali	D	Guinée	11.3	-11.3	1903	1994	320.6
Sirakamana	D	Guinée	11.0	-11.8	1903	1995	48.8
BafingMakana	D	Mali	12.6	-10.3	1960	2006	236.3
DakaSaidou	D	Mali	11.9	-10.6	1952	2006	219.72
Bebele	D	Mali	12.8	-9.5	1970	1991	33.9
Dibia	D	Mali	13.2	-10.8	1903	1993	236.2
FadougouDrag	D	Mali			1903	1995	95.4
Galougo	D	Mali	13.8	-11.1	1903	1995	529.36
Gourbassi	D	Mali	13.4	-11.6	1954	2006	101.9
Kayes	D	Mali	14.4	-11.4	1903	2006	408.9
ManantaliAvl	D	Mali	13.2	-10.4	1987	2006	360.3
Oualia	D	Mali	13.6	-10.4	1954	2006	111.07

Aftout	D	Mauritanie	16.5	-16.3	2000	pas de données	pas de données
Bogue	D	Mauritanie			1903	pas de données	pas de données
Cheyal	D	Mauritanie	16.4	-16.3	2000	pas de données	pas de données
Dalagona	D	Mauritanie	16.5	-16.1	2000	pas de données	pas de données
Dalagona Amt	D	Mauritanie	16.6	-16.2	2000	pas de données	pas de données
Rosso	D	Mauritanie	16.5	-15.8	1954	pas de données	pas de données
Dagana	D	Sénégal	16.5	-15.5	1903	1989	605.7
DiamaAval	D	Sénégal	16.2	-16.4	1988	2006	342.12
Kidira	D	Sénégal	14.4	-12.2	1930	2006	117.8
Matam	D	Sénégal	15.6	-13.3	1903	2005	202.3
Bakel	D	Senegal	14.9	-12.45	1903	2006	579

ANNEXE 4 : CARTE DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES DU BASSIN VERSANT DU FLEUVE SÉNÉGAL

