

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



École Doctorale « EAU, QUALITE ET USAGES DE L'EAU »



FACULTÉ DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES
DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE

Année : 2012-2013 N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT

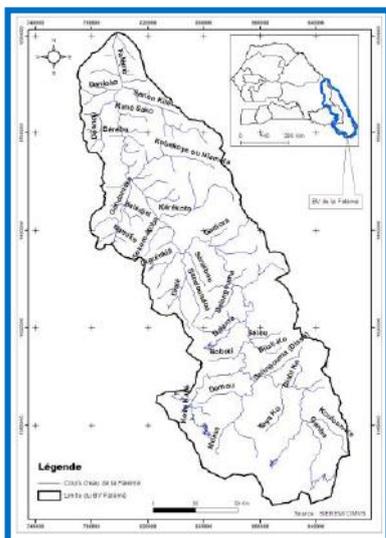
Domaine : SCIENCE DE L'EAU
Mention : RESSOURCES EN EAU
Spécialité : HYDROLOGIE CONTINENTALE

Présentée par :

Cheikh FAYE

Titre :

**EVALUATION ET GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES
EN EAU DANS UN CONTEXTE DE VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE :
CAS DU BASSIN VERSANT DE LA FALEME.**



Soutenu le 07 décembre 2013 devant le jury composé de :

Président :	M. Salif DIOP	Professeur	Dép. de Géographie/FLSH/UCAD
Rapporteur :	M. Pascal SAGNA	Maître de Conférences	Dép. de Géographie/FLSH/UCAD
Rapporteur :	M. Bi Tié Albert GOULA	Professeur	UFR-SGE/UNA (Côte d'Ivoire)
Examineur :	M. Serigne FAYE	Professeur	Dép. de Géologie/FST/UCAD
Directeur de thèse :	M. Amadou Abdoul SOW	Maître de Conférences	Dép. de Géographie/FLSH/UCAD



1: Transport par pirogue de l'aliment de base dans le bassin (le maïs) à Gourel Bocar Samba. Cliché de Faye C, octobre 2009.

2 : Adduction en eau potable à partir de la Falémé à Naye. Cliché de Faye C, octobre 2009.

3 : Champs (de maraichage ou de cultures de décrue) perpendiculaires au cours d'eau à Sanankolé. Cliché de Faye C, octobre 2009.

4 : Abreuvement d'un troupeau de moutons sur la Falémé à Sansamba. Cliché de Faye C, avril 2010.

5 : Lavage de l'or par calebasses sur le lit du fleuve à Niéniéko. Cliché de Faye C, décembre 2010.

6 : Retour d'un pêcheur, un capitaine à la main à Moussala (Sadatou). Cliché de Faye C, avril 2011.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	A
SIGLES ET ABREVIATIONS	2
AVANT-PROPOS	4
RESUME DE L'ETUDE	7
INTRODUCTION GENERALE	8
METHODOLOGIE DE L'ETUDE	15
PARTIE I : LE CADRE THEORIQUE DE LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU DANS UN BASSIN TRANSFRONTALIER	17
CHAPITRE I : L'ANALYSE CONCEPTUELLE	18
CHAPITRE II : L'ÉTAT DES RECHERCHES SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DE LA FALEME 27	
CHAPITRE III : LES DONNÉES, LES OUTILS ET LES MÉTHODES DE L'ÉTUDE	36
PARTIE 2 : LA FALEME ET SON BASSIN	57
CHAPITRE IV : LE MILIEU ET LES FACTEURS STABLES DE L'ÉCOULEMENT	58
CHAPITRE V : LE CLIMAT DU BASSIN ET SA VARIABILITE	87
CHAPITRE VI : L'INFLUENCE DES FACTEURS SUR L'ÉCOULEMENT	127
PARTIE 3 : L'ÉCOULEMENT ET SA VARIABILITE DANS LE BASSIN DE LA FALEME	134
CHAPITRE VII : LE REGIME MOYEN ET SA VARIABILITE	135
CHAPITRE VIII : LE BILAN DE L'ÉCOULEMENT ET LES DISPONIBILITES EN EAU	179
CHAPITRE IX : UNE CONTRIBUTION DU MODELE GR2M A L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN	188
PARTIE 4 : L'ESPACE ET LA SOCIETE : GESTION DES EAUX DU BASSIN DE LA FALEME	205
CHAPITRE X : LE MILIEU ET LES HOMMES	206
CHAPITRE XI : LES RESSOURCES EN EAU ET L'ECONOMIE RURALE	215
CHAPITRE XII : LA GESTION ET L'AMENAGEMENT INTEGRES DES RESSOURCES EN EAU 239	
CONCLUSION GENERALE	261
BIBLIOGRAPHIE	263
TABLE DES ILLUSTRATIONS	275
LISTE DES ANNEXES DE DONNEES	280
TABLE DES MATIERES	306

SIGLES ET ABBREVIATIONS

ACP : Analyses en Composantes Principales	DRDR : Direction Régionale du Développement Rural
ADT : Analyse Diagnostique Transfrontalière	DRH : Divisions régionales de l'hydraulique
AEP : Alimentation en Eau Potable	EIES : Etudes d'Impact environnemental et Social
AGEFORE : Groupement pour l'Aménagement et la Gestion de Forêts et l'Environnement	ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
ANACIM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie	ETP : Évapotranspiration Potentielle
ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie	ETR : Évapotranspiration Réelle.
ASC : Association Sportive et Culturelle	FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar	FEM (GEF) : Fonds Mondial pour l'Environnement (<i>Global Environmental Facility</i>)
ASUFOR : Associations des Usagers des Forages	FFEM : Fond Français pour l'Environnement Mondial
BPF : Brigades des puits et forages	GBV : Gestion par Bassin Versant
BRGM : Bureau des Recherches Géologiques et Minières	GBVT : Gestion par Bassin Versant Transfrontalier
CADL : Centre d'Appui au Développement Local	GEF/BFS : Projet de Gestion des Ressources en Eau et de l'Environnement du Bassin du fleuve Sénégal
CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques	GIE : Groupement d'Intérêt Economique
CEDEAO : Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest	GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
CEMAGREF : Centre national du machinisme agricole, du génie rural et des eaux et forêts	GIEBV : Gestion Intégrée de l'Eau par Bassin Versant
CERP : Centre d'Expansion Rural Polyvalent	GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
CIAT : Centre International de l'Agriculture Tropicale	GPS : Global Positioning System
CMD : Coefficient Mensuel de Débit	GR2M : Génie Rural, modèle à 2 paramètres et au pas mensuel.
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique	GWP/AO : <i>Global Water Partenership / Partenariat ouest-africain de l'eau</i>
COGESAF : Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François.	IFAN : Institut Fondamental d'Afrique Noire
CREPA : Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement	IPCC : International Panel on Climate Change
CSE : Conseil Supérieur de l'Eau	IRD : Institut de Recherche pour le développement en coopération
CSE : Centre de Suivi Ecologique	IREF : Inspection Régionale des Eaux et Forêts
CSPLP : Cellule de Suivi du Programme de Lutte contre la Pauvreté	LERG : Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Géomatique
CTE : Comité Technique de l'Eau	MARP : Méthode Accélérée de Recherche Participative
CV : Coefficient de Variation	MAS : Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal
DCE : Directive Cadre sur l'Eau	MDL : Mineral Deposit Limited
DCR : Débit de Crise	MEAF : Mission d'Etudes et d'Aménagement du fleuve Sénégal
DGPRES : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau	MIFERSO : Société des Mines de Fer du Sénégal Oriental
DMG : Direction des Mines et de la Géologie	MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
DNHE : Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie. (République de Mali)	
DNCN : Direction Nationale de la Conservation de la Nature	
DOE : Débit Objectif d'Etiage	

NJE : Nombre de Jours d'Écoulement
OERS : Organisation des États Riverains du Sénégal
OMD : Objectifs du Millénaire pour le Développement
OMM : Organisation Météorologique Mondiale,
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
ONAS : Office nationale de l'Assainissement du Sénégal
ONG : Organisation Non Gouvernementale
ONU : Organisation des Nations Unies
ORSTOM : Office de Recherche Scientifique et technologique d'Outre Mer
PAS : Plan d'Action Stratégique
PASIE : Programme d'Atténuation et de Suivi des Impacts sur l'Environnement
PASMI : Programme d'Appui au Secteur Minier
PDE : Plan Directeur de l'Eau
PEPAM : Programme Eau Potable et Assainissement du Millénaire
PGE : Plan de Gestion des Etiages
PGIRE : Programme de Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PLT : Projet Eau à Long Terme
Pmm : Pluie moyenne estimée et reçue par le bassin versant en mm
PNES : Partenariat National de l'Eau du Sénégal
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
PRDI : Plan Régional de Développement Intégré
Qmm : Lame d'eau écoulée en tenant compte de la surface du bassin versant en mm
RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SAED : Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal, des Vallées du Fleuve Sénégal et de la Falémé
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDE : Sénégalaise des Eaux
SGPRE : Service de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
SIEREM : Système d'Information Environnementales sur les Ressources en Eaux en Afrique pour leur Modélisation
SMC : Sabodala Mining Company
SODEFITEX : Société de Développement des Fibres et Textiles
SONES : Société Nationale des Eaux du Sénégal
SRADL : Service Régional d'Appui au Développement Local
SREMI : Service Régional de l'Énergie, des Mines et de l'Industrie
TAC : Technical Advisory Committee
TDS : Taux de Solides Dissous
UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar
UCRE : Unité de Coordination des Ressources en Eau
UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture
USAID : United States Agency for International Development
ZADE : Zones d'Aménagement et de Développement de l'Eau

AVANT-PROPOS

Cette thèse, intitulée « **Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé.** », se situe avant tout sur le plan de la connaissance et de la compréhension des modalités de l'hydrologie fluviale et de la gestion intégrée des ressources en eau, en domaine tropical africain, dans un contexte de péjoration climatique. Cette contribution, combien modeste, est une des rares études d'ensemble, à notre connaissance, en hydrologie fluviale et en gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin de la Falémé. Il s'agit aussi vraisemblablement de l'une des dernières qui porteront sur son régime naturel car, dans le cadre de ses projets d'aménagement et de gestion des eaux du fleuve Sénégal, l'OMVS projette la construction d'un barrage à Gourbassi sur la Falémé.

L'objectif de cette étude est de caractériser la variabilité hydroclimatique du bassin de la Falémé dans le but d'une gestion de ses eaux. Ainsi, la thèse que nous allons défendre tout au long du document est : « Dans un contexte de variabilité hydroclimatique où la maîtrise des déficits en eau demeure un enjeu majeur, l'évaluation et la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin de la Falémé, sont indispensables, tant pour améliorer son environnement naturel que pour assurer le bon fonctionnement des activités liées à l'eau ».

Epreuve solitaire, la thèse n'en demeure pas moins un cheminement collectif. Que ce soit sur un plan scientifique ou social, la réalisation de cette thèse de doctorat a été possible grâce au concours appréciable d'un nombre de personnes physiques et morales. Il est donc pour nous un grand honneur et un réel plaisir de leur rendre hommage. Nous témoignons notre profonde reconnaissance et formulons de très vifs remerciements aux personnes qui de près ou de loin ont apporté leur soutien et contribué à finaliser ce travail.

- En premier lieu, nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre directeur de thèse, M Amadou Abdoul SOW, Maître de Conférences et non moins Doyen de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Nous lui restons redevables pour la réalisation de ce travail. Durant toute la durée de la thèse, il nous a réservé des moments précieux de discussion et nous a facilité toutes les conditions pour mener ce travail jusqu'à terme. Il nous a ouvert au monde professionnel de l'eau en nous transmettant ses savoir-faires, ses connaissances ainsi que des données appliquées à notre terrain d'étude. Nous le remercions infiniment pour son apport à la cohérence de ce manuscrit, sa disponibilité et sa sympathie, et pour tout ce qu'il fait chaque jour à notre égard. En dépit de ses multiples occupations, il a bien voulu assurer la direction de ce travail. Ses conseils et ses suggestions nous ont été bénéfiques et ont permis de parfaire cette étude. Qu'il daigne trouver ici l'expression de nos profonds remerciements.

Il y a quelques années auparavant, lorsque je quittais le village pour venir à Dakar, le bac en poche, pour suivre des études supérieures, j'étais très loin d'imaginer que j'y soutiendrais une thèse. Arrivé à l'Université, je suis allé vérifier mon orientation sur les listes qui venaient d'être affichées. Désespéré, je l'étais en me rendant compte de l'absence de mon nom sur la liste des nouveaux bacheliers orientés au Département de Géographie. Orienté et inscrit au Département de Russe, je ne me sentais pas du tout à l'aise. Après mon inscription au Département de Russe et mon premier cours avec feu le Professeur Gadiaga, je suis venu, désespéré, chercher la "grâce" au Département de Géographie. A mon arrivée, je suis tombé sur la fin d'une Assemblée de Département. Dès que les professeurs sont sortis, je me suis adressé au premier rencontré, Monsieur Diène DIONE qui, du coup, m'a indiqué Monsieur Amadou Abdoul SOW, Chef du Département par intérim à l'époque. Larmes aux yeux, je lui ai intégralement expliqué ma situation. Dans mes propos, on pouvait noter : « *Je ne suis pas venu du village pour faire des études supérieures en Russe* ». Conscient de la profondeur de mon amour pour la Géographie, il a pris acte et a accepté de m'orienter au Département de Géographie. Ainsi, Il m'a accompagné à la scolarité pour me faire changer la carte d'étudiant. Ce qui m'a permis de ne pas payer, pour une deuxième fois, la quittance d'inscription. N'eût été son aide, je n'aurais pas fait des études en Géographie, jusqu'à y soutenir une thèse.

De plus, lorsque j'ai obtenu ma licence et que je devais solliciter un encadrement auprès d'un enseignant, pour le mémoire de maîtrise, je suis encore revenu le voir. Seulement, comme c'était au mois d'août, il m'a demandé de revenir au début de l'année universitaire car, en cette période, il n'avait pas encore commencé à prendre des étudiants pour un encadrement. Aussitôt que j'ai quitté le bureau, il est sorti et m'a demandé de revenir, certainement en se souvenant de mon histoire de première année. Du coup, il s'est engagé à m'encadrer en me demandant de réfléchir et de choisir un sujet en hydrologie continentale. Depuis ce jour, il n'a ménagé aucun effort pour me soutenir dans les études.

- M Safif Diop, *Professeur à l'Université Cheikh Anta de Dakar, a bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse et d'examiner ce travail de recherche. Nous lui exprimons nos très vifs remerciements et notre profond respect.*
- M le Professeur Bi Tié Albert GOULA de l'Université Mangui Abrogoua (Côte d'Ivoire) a bien voulu être rapporteur de notre thèse. Nous le remercions vivement pour toutes les suggestions. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance.
- M. Pascal SAGNA, *Maitre de Conférences à l'Université Cheikh Anta de Dakar qui a accepté d'être un rapporteur de notre travail. Nous le remercions vivement pour les différentes suggestions.*
- Nous remercions également M. Serigne FAYE, *Professeur à l'Université Cheikh Anta de Dakar, qui a accepté d'examiner ce travail de recherche. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance.*
- M Mamadou Bouna Timéra, *Chef du Département de Géographie pour tous ces conseils et ses encouragements qu'il nous a prodigués et qui nous a aidé le plus possible durant cette étude. Nous le remercions très sincèrement pour sa sympathie, ses remarques et ses discussions intéressantes.*
- M Oumar Sankharé, *Professeur titulaire au Département de Lettres Classiques, qui a accepté de lire l'intégralité du document pour sortir les coquilles et corriger la syntaxe et le style. Nous le remercions très sincèrement pour ses corrections et ses remarques intéressantes.*
- Mlle Ndèye Marème Faye, *Assistante du Chef du Département de Géographie pour tous ses conseils, ses encouragements. Nous la remercions très sincèrement pour sa sympathie et ses remarques.*
- A l'issue de nos études, nous nous sentons obligé d'exprimer notre gratitude à tous ceux qui nous ont soutenus moralement et matériellement. Nous rendons particulièrement un hommage sincère à tous les professeurs du Département de Géographie dont le dévouement et les qualifications intellectuelles étendues nous ont forgé et armé pour la vie.
- Nos collègues doctorants de l'Ecole Doctorale « *Eau, Qualité et Usages de l'Eau* » pour leur soutien permanent, les apports constructifs, et leur amitié généreuse. Sans votre coopération, la thèse serait loin d'être ce qu'elle est. Il en est de même pour nos collègues professeurs du lycée J. F. Kennedy.
- Cette thèse n'aurait pas pu se faire sans la participation de toutes les personnes interrogées, travaillant dans le domaine de l'eau, à tous les échelons, et plus ou moins en lien avec le bassin de la Falémé. Leur disponibilité et leur coopération nous ont permis de mener à bien ce travail. Un grand merci à vous tous, qui êtes trop nombreux pour vous citer. Nous pensons tout spécialement ici à la

sympathique famille Danfakha que nous remercions chaleureusement pour l'accueil, en particulier Mady avec qui, nous avons des échanges constructifs autour de la question de l'eau dans le bassin.

- Je souhaite souligner à quel point j'ai apprécié d'avoir rencontré et côtoyé les Docteurs Mamadou Sow et Ablaye Diagne. Les discussions que j'ai eues avec eux ont été toujours intéressantes. Ils ont également accepté de porter leurs observations sur la méthodologie.

- Nous n'oublions pas dans ces remerciements tous nos amis du Département de Géographie et de l'Universitaire Cheikh Anta Diop de Dakar, pour leur ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, leur sympathie et leur soutien durant toutes ces années de recherche. Nous citons : Pape Ibrahima, Ibou Dieng, Sidy, Sylla, Ibrahima, Moustapha, Eddy, Laye, Mame Birame, Alioune Badara, Dieyna, Ndickou, Aichétou, Aminata, Sali, Fama, Magassouba, Riski, Cheikh, Sagna, Bakary, Elimane, Faustin, Mairam, Khady, Djikoune, Amadou Ka, Matar, Mor Khary, Kény, Codou, Adrien, Thiam, Saliou, Mamadou, Joe, Raky, Ablaye ... Je les remercie très sincèrement.

- Nous adressons nos très chaleureux remerciements aux membres de notre famille pour leur soutien moral et matériel durant toutes ces années de thèse. Ils nous ont permis de contourner tous les obstacles. Leur soutien, dans les moments de découragement, nous a permis de faire avancer en toute sérénité dans la recherche. Nous exprimons donc notre profonde reconnaissance aux piliers de cette réussite. Ils nous ont toujours aidé, encouragé et soutenu durant toutes ces longues années de recherche jusqu'au l'achèvement de ce travail :

- Notre mère Aissatou Faye et notre père Ndiène Faye qui nous ont toujours soutenu dans les moments difficiles et nous ont donné beaucoup de courage ; notre sœur Ndella, notre femme Siga Faye et nos deux jumeaux Ousseynou et Assane qui nous ont donné la force de soulever des montagnes grâce à leur présence et à tout leur amour : sans eux rien n'aurait pu être fait.

- Les autres membres de la famille tels que : Ada et sa femme Ngossé, Saliou, Daouda, feu Ndiène, Modou, Pare, Ousmane, Ablaye, Yoro, Mbène, Nogoye, Siga, Fatou, Daba, Ibou, Bigué, Abdoulaye, Galass, Pape, Ibrahima, Omar, Mbaye, Serigne, Ameth, Penda, Diarra, Dibou, Khady, Issa ..., mes tantes Dibou, Ami, Salla, Thiackou, Falla, Nogoye, Astou ...

Ce que nous leur devons va bien au delà des remerciements ou même de la gratitude. Notre vocabulaire est trop limité pour exprimer leur importance dans ce travail et dans notre vie. Ils le savent. Cette étude à laquelle nous mettons un terme, c'est avant tout à eux que nous les devons, à eux qui, depuis toujours et en particulier tout au long de ces dernières années, ont su partager avec patience et amour nos instants de joies.

- Nous remercions enfin toutes les personnes intéressées par notre travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans notre rapport de thèse des explications utiles.

Nous dédions enfin ce travail à notre grand-mère Ami Faye.

Que Dieu vous laisse encore en vie pendant plusieurs années.

RESUME DE L'ETUDE

La thèse analyse le fonctionnement hydrologique de la Falémé, affluent du fleuve Sénégal dans le contexte de la péjoration pluviométrique qui a sévèrement affecté et qui affecte encore l'Afrique subsaharienne. La variabilité des écoulements du bassin versant de la Falémé est analysée pour la période 1950-2008 (59 ans), en comparant les lames d'eau reçues et les débits écoulés. L'approche combinée de données météorologiques (climat), hydrologiques (écoulement), socioéconomiques (démographie, culture, économie) et environnementales sur la base d'observations et d'enquêtes de terrain est ici privilégiée.

La première partie fait l'état de la question sur l'hydrologie de la Falémé et l'analyse des concepts.

La deuxième partie étudie la variabilité hydroclimatique sur la période 1950-2008. Il ressort de l'analyse que les déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 ont été fortement ressentis dans les écoulements de la Falémé et de ses affluents. Les déficits d'écoulement sont nettement supérieurs aux déficits pluviométriques.

La troisième partie est un essai de modélisation pour simuler les écoulements moyens des sous bassins de la Falémé, au pas de temps mensuels. Le modèle GR2M, qui a été appliqué et qui semble adapté, montre une nette tendance à la baisse des écoulements, notamment dans le sous-bassin de Fadougou.

La quatrième partie concerne la gestion de l'eau dans le bassin. Malgré ses énormes potentialités, le bassin est caractérisé aujourd'hui par un déséquilibre écologique engendré par la baisse continue de la pluviométrie, les sécheresses répétées, la poussée démographique et les techniques de production inappropriées. L'atténuation des effets de ce déséquilibre passe par la définition et la mise en application d'un plan d'aménagement et de gestion des ressources en eau du bassin.

Une Gestion Intégrée des Ressources en Eau à l'échelle du bassin de la Falémé devra permettre d'améliorer la capacité de résilience des hydrosystèmes et la capacité d'adaptation des différents acteurs et usagers de l'eau.

Mots clés : *variabilité hydroclimatique, écoulement, ressources en eau, gestion intégrée, bassin versant, bassin transfrontalier, évaluation, planification.*

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, une des plus importantes ressources naturelles, doit être gérée de manière à garantir de façon durable son équilibre entre les besoins et les utilisations.

Le développement durable des activités humaines s'appuie, en particulier, sur une gestion intégrée des ressources en eau. Cette gestion efficace et durable des eaux, dans un bassin versant, doit prendre en compte la manifestation des événements extrêmes de l'écoulement, tels que les étiages et les crues.

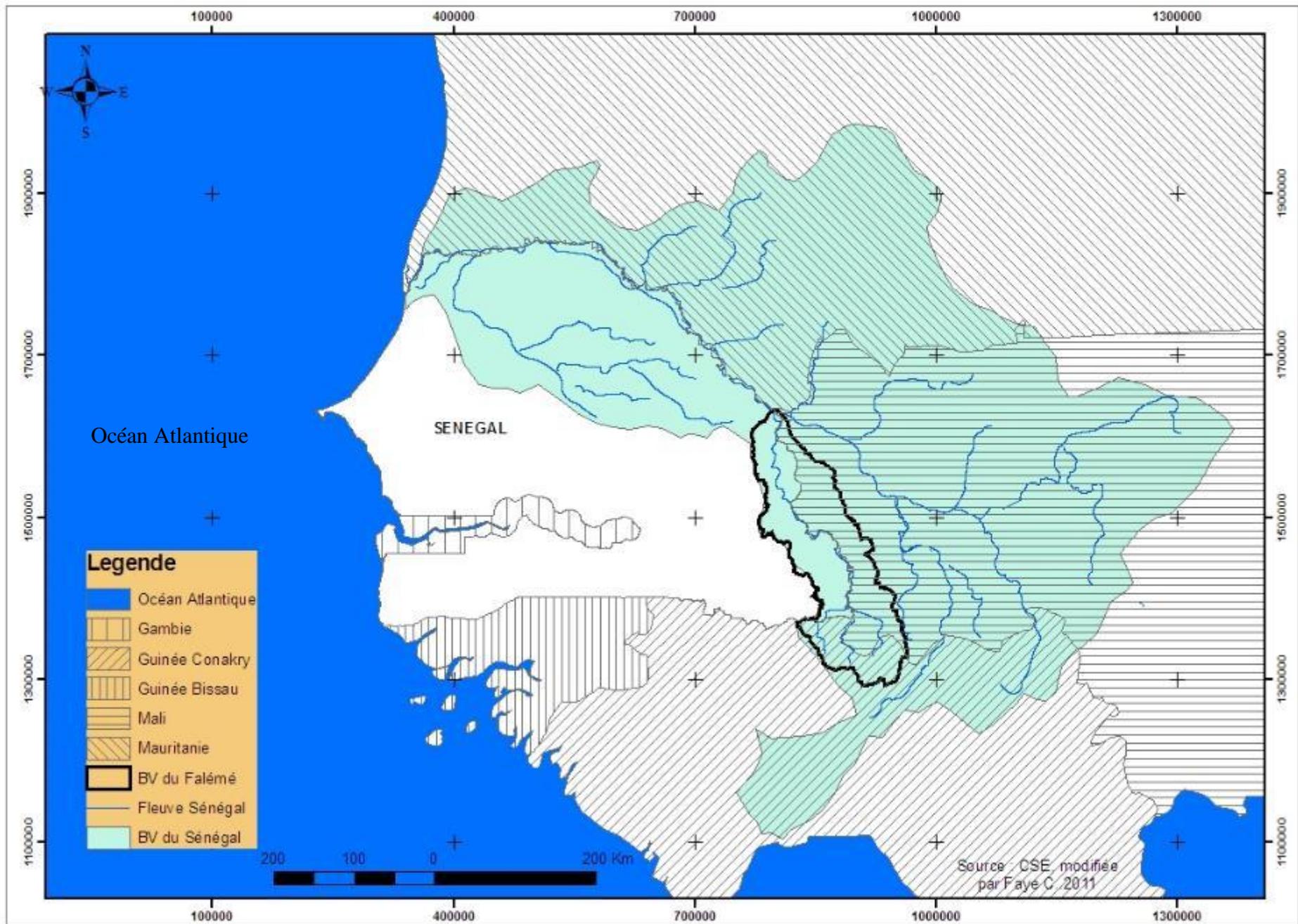
La quantité et la qualité des ressources en eau disponibles posent des problèmes de plus en plus complexes et difficiles à résoudre, devant les besoins qui augmentent considérablement dans les pays en voie de développement, ce qui rend nécessaire la gestion intégrée de la ressource pour un développement durable social et économique garantissant la préservation de l'environnement.

A l'instar des pays de la façade atlantique de l'Afrique de l'Ouest, le Sénégal, pays à climat essentiellement tropical à variante soudanienne et sahélienne (semi-aride) dans la partie septentrionale de son territoire, connaît un problème de développement et de gestion durable de ses ressources en eau. En effet, bien que disposant d'importantes ressources en eau douce (cours d'eau, lac, nappes), celles-ci sont limitées à cause d'une forte demande (qui résulte de la croissance démographique, de l'amélioration des conditions de vie, du développement des différentes industries et de l'extension de l'irrigation) et d'une inégale répartition spatio-temporelle.

Devant ces contraintes, le Sénégal, dans le cadre de l'OMVS, a fourni, depuis les années 1980, d'importants efforts de mobilisation de son potentiel hydraulique pour faire face à la croissance démographique et assurer son développement socio-économique. Cependant, cette inégale répartition du potentiel hydraulique nécessite, parallèlement, la poursuite de l'effort de mobilisation par :

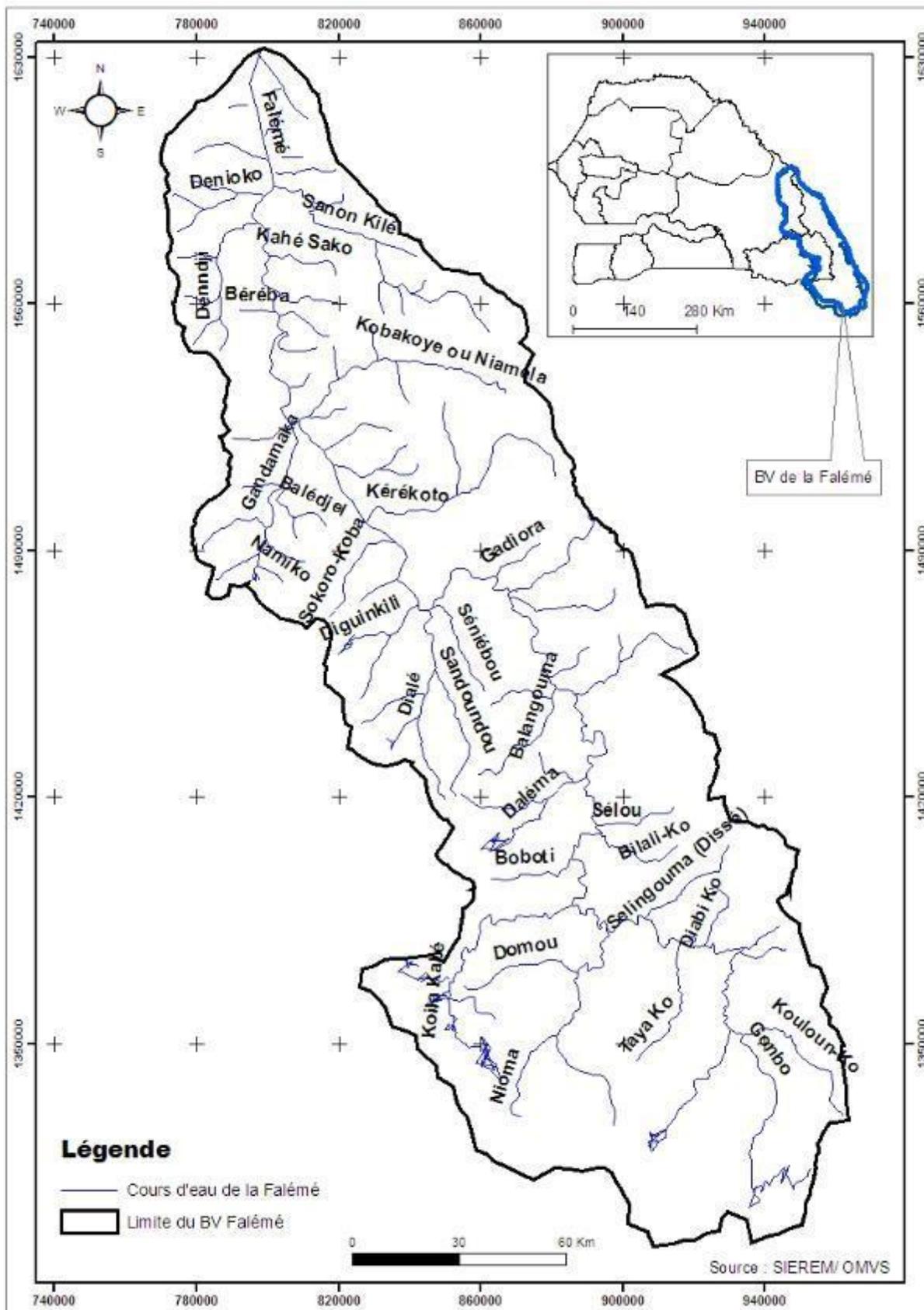
- la maîtrise des phénomènes hydrologiques extrêmes (crues et étiages) ;
- l'établissement de plans directeurs de développement des ressources en eau à l'échelle des bassins versants ;
- l'adoption d'une stratégie de gestion de la demande en eau afin de satisfaire les besoins et d'assurer les conditions d'une utilisation bénéfique de ces ressources hydriques ;
- l'amélioration des performances des infrastructures (barrages, ouvrages de transfert d'eau, forages).

L'hydrologie du Sénégal reste dominée par le fleuve Sénégal (**Carte 1**) dont le bassin versant s'étend sur une superficie de 289000 km². Ce bassin est partagé entre quatre Etats : le Mali (53,5%) ; la Mauritanie (26%) ; la Guinée Conakry (11%) et le Sénégal (9,5%).



Carte 1 : Situation géographique du bassin versant de la Falémé, du fleuve Sénégal et des Républiques du Sénégal, du Mali et de la Guinée

Le bassin versant du fleuve Sénégal est subdivisé en trois parties : le haut bassin, le cours moyen et la zone deltaïque. Dans le haut bassin en amont de Bakel, le fleuve Sénégal reçoit ses trois principaux affluents : le Bafing, le Bakoye et la Falémé. La Falémé est l'objet de cette présente étude et son bassin est partagé entre les Républiques de Guinée Conakry, du Mali et du Sénégal (Carte 1 et (Carte 2)).



Carte 2 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Falémé

La Falémé, affluent du fleuve Sénégal, prend sa source à 800 m d'altitude au pied du Fouta Djallon. Son bassin versant se situe entre les latitudes 12°11' et 14°27' N et les longitudes 11°12' et 12°15' O. Il couvre une superficie de 28900 km², soit 10% de la superficie totale du bassin versant du fleuve Sénégal dont il constitue le dernier grand affluent, long de 625 km.

Tout comme le fleuve Sénégal, le bassin de la Falémé est à cheval sur les trois Républiques du Mali (pour 13800 km², soit 47,8%), du Sénégal (pour 11500 km², soit 39,7%) et enfin de la Guinée Conakry (pour 3600 km², soit 12,5%).

La délimitation du bassin de la Falémé, (avec le caractère contrasté du micro-relief du bassin) reste délicate à cause de la complexité du maillage hydrographique des différents affluents du cours d'eau principal.

Le réseau hydrographique de la Falémé est formé de deux « branches mères », le Koila Kabé et le Balinn Ko, grossies par de nombreux affluents : le Kouloun Ko, le Gombo, le Kounda Ko, le Khassaye... (Carte 2).

A la confluence de ces deux « branches mères », la Falémé se trouve constituée et s'allonge sur 625 km de long jusqu'à la confluence avec le fleuve Sénégal. La Falémé est souvent à sec sur une partie de son cours pour une bonne partie de l'année.

Du fait de l'étendue de son bassin, qui couvre trois domaines géographiques et surtout climatiques, le régime des eaux de la Falémé se caractérise par une très grande variabilité spatio-temporelle. La lame d'eau moyenne écoulée (Qmm), la lame d'eau moyenne reçue (Pmm) et le volume total de l'eau écoulée en année (Vm³/an) connaissent les mêmes variations. Par exemple, pour la période de 54 ans allant 1954 à 2008 (période sur laquelle les données sont disponibles), selon des données de la Direction de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (DGPRE) utilisées dans cette étude :

- A la station de Fadougou qui se situe à 12° 31' de latitude Nord et 11° 23' de longitude Ouest : Qmm est de 257 pour Pmm de 1235 et Vm³/an de 2 391 413 909 ;
- A la station de Gourbassi qui se situe à 13° 24' de latitude Nord et 11° 38' de longitude Ouest : Qmm est de 189 pour Pmm de 1090 et Vm³/an de 3 225 756 354 ;
- A la station de Kidira qui se situe à 14° 27' de latitude Nord et 12° 13' de longitude Ouest : Qmm est de 136 pour Pmm de 948 et Vm³/an de 3 276 602 261.

On constate que Qmm diminue du Sud (Fadougou) au Nord (Kidira), conformément à Pmm. Mais avec l'accroissement de la taille du bassin et l'arrivée de d'affluents, Vm³/an augmente du Sud vers le Nord.

La variabilité se mesure aussi à travers les valeurs extrêmes de l'écoulement : par exemple, en 1961-62, la crue a atteint une valeur de 3108 m³/s à Kidira alors que l'étiage n'a enregistré qu'une valeur de

0.90 m³/s à la même station, soit un écart de 3107 m³/s. Ce qui est énorme et témoigne de la sévérité des étiages.

Les précipitations diminuent fortement du sud du bassin vers le nord (de 1200 mm à Labé à 600 mm à Bakel). Cela entraîne une variabilité des paysages dans le bassin.

La diminution de la pluviométrie occasionnant des sécheresses répétées, l'accroissement de la population du bassin, les techniques de production agricole, ont entraîné un déséquilibre écologique dans le bassin de la Falémé. Par endroits, dans le bassin, on note l'apparition et/ou l'aggravation de risques de dégradation comme l'érosion des sols, l'ensablement du lit des cours d'eau, l'apparition de végétaux flottants sur les plans d'eau, etc.

L'indice d'écoulement de la Falémé d'une valeur de 3 276 602 261 m³/an en moyenne sur la période 1954-2008 à Kidira, suivant un débit moyen de 124 m³/s, grossit le fleuve Sénégal et perturbe les lâchers d'eau provenant du barrage de Manantali. Cela fonde la nécessité de la maîtrise des eaux de la Falémé pour un système artificialisé du bassin du fleuve Sénégal.

La maîtrise de ses eaux avec la mise en eau d'un barrage hydroélectrique à Goubassi devrait permettre :

- Le contrôle des débits de la Falémé et la maîtrise totale du bassin du fleuve Sénégal ;
- La production d'énergie électrique et la rentabilité du barrage de Manantali pour résorber le déficit énergétique des Etats membres ;
- La sécurisation de la navigation permanente sur le fleuve Sénégal ;
- L'accroissement des superficies cultivables dans la vallée.

Cette étude du bassin de la Falémé a pour objectif principal d'établir le bilan hydrologique de l'écoulement pour quantifier les ressources en eau disponible en vue de leur planification et de leur gestion dans un contexte de variabilité hydroclimatique.

Les objectifs spécifiques retenus de cette étude sont de :

1. **Caractériser la variabilité hydroclimatique dans le bassin** en réactualisant les études avec les séries temporelles plus longues que celles utilisées Dione O. (1996) et Sow A.A, (2007), mais aussi étudier les relations entre facteurs de l'écoulement et comportement hydrologique du bassin, notamment par les relations entre pluie et débit ;
2. **Evaluer les ressources en eau disponibles du bassin** à l'échelle des trois sous-bassins, l'accessibilité et la demande en eau des usagers ;
3. **Tester l'efficacité d'un modèle globale (GR2M)** pour simuler la variabilité hydroclimatique dans le bassin à un pas de temps mensuel pour mettre en évidence la relation pluie-débit ;

4. **Proposer un modèle de gestion et de planification des ressources en eau**, un modèle GIRE pour concilier les besoins en eau des populations et la préservation de la ressource et de l'environnement.

La Falémé joue un rôle stratégique et géopolitique majeur en tant que fleuve partagé entre trois Etats (Sénégal, Mali et Guinée Conakry). Les ressources sont devenues une responsabilité commune de ces trois Etats.

Les hypothèses de recherche suivantes sont retenues :

1. **Les déficits pluviométriques et la forte variabilité hydroclimatique constatés ces trois dernières décennies en Afrique de l'Ouest ont entraîné une baisse drastique des ressources en eau dans le bassin de la Falémé.**

La Falémé connaît de longues périodes de basses eaux avec un tarissement complet. Le débit moyen mensuel observé à la station de Kidira en mai (minimum d'étiage) n'atteint que 0,6 m³/s, soit plus de 2433 fois moins que le débit moyen du mois de septembre (633 m³/s). Cela témoigne de la très grande variabilité saisonnière. Sur la période d'observation de 54 ans, le débit mensuel minimal a été de 0 m³/s pour un débit mensuel maximal de 3108 m³/s.

2. **L'évaluation de la disponibilité et de l'accessibilité à l'eau par les différents usagers sont nécessaires pour l'économie rurale du bassin.**

Les activités traditionnelles des populations sont le maraîchage, l'agriculture pluviale et de décrue, la pêche, l'élevage, l'orpaillage, le transport par voie fluviale. Elles sont toutes liées directement à l'eau et procurent des revenus aux populations.

3. **Le modèle GR2M permet de caractériser la variabilité hydroclimatique et d'évaluer les ressources en eau du bassin.**

Il est utilisé pour simuler le comportement hydrologique du bassin avec la mise en place prochaine du barrage réservoir de Goubassi ;

4. **Une gestion des ressources en eau et de l'environnement est un facteur de développement.**

La présence de l'eau rythme les stratégies de mise en valeur et de gestion du milieu. L'accès et la bonne gestion de la ressource sont des facteurs de développement économique et social. C'est dans cette optique que les Etats riverains du fleuve Sénégal (Mali, Mauritanie et Sénégal) se sont organisés depuis 1972 au sein de l'OMVS pour mettre en valeur le bassin du fleuve et exploiter rationnellement ses ressources. La problématique de la gestion de l'espace du bassin de la Falémé repose sur les stratégies et le cadre juridique des Etats membres de l'OMVS, mais nécessite une forte mobilisation à tous les niveaux : Etat, acteurs locaux, populations et partenaires financiers.

Notre travail de recherche aborde trois axes majeurs. Le premier concerne l'étude de la variabilité hydroclimatique dans le bassin de la Falémé, le deuxième la modélisation hydrologique et le troisième la gestion de l'eau dans le bassin. En définitive, cette thèse s'organise autour des quatre parties suivantes :

1. La **première partie** constitue le cadre théorique général de la thèse. Elle traite de l'analyse conceptuelle (**CHAPITRE I**), de l'état de la question (**CHAPITRE II**) et présente les données et l'approche méthodologique (**CHAPITRE III**).
2. La **deuxième partie** examine le cadre de l'étude et présente une vue d'ensemble du bassin de la Falémé et de ses caractéristiques physiques (**CHAPITRE IV**) et la variabilité des paramètres climatiques (**CHAPITRE V**) : la pluviométrie, le vent, la température, l'humidité relative, l'évaporation, l'insolation et leur influence sur l'écoulement. Toutes les informations obtenues sur ce bassin sont rassemblées et analysées en rapport avec leurs influences sur l'écoulement de la Falémé (**CHAPITRE VI**).
3. La **troisième partie** est consacrée à l'écoulement dans le bassin de la Falémé et à sa variabilité dans l'espace et dans le temps. Nous analysons la variabilité du régime, les crues, les étiages, le tarissement dans les trois sous-bassins Fadougou, Gourbassi et Kidira (**CHAPITRE VII**), le bilan de l'écoulement et les disponibilités en eau du bassin (**CHAPITRE VIII**). Les cours d'eau étant intégrateurs par excellence des modifications climatiques, l'étude des chroniques de débits mesurés dans le bassin permet de mettre en évidence l'impact de la péjoration climatique sur l'écoulement. Enfin, nous avons utilisé le modèle pluie-débit (GR2M) pour étudier la variabilité hydroclimatique et ses impacts sur les ressources en eau du bassin versant (**CHAPITRE IX**).
4. La **quatrième partie** aborde les relations eau-espace-société dans une problématique de gestion des eaux du bassin. La présence de l'eau rythme l'évolution des systèmes de production et la péjoration pluviométrique a profondément bouleversé les activités des populations, ce qui nécessite un plan d'aménagement et de gestion des eaux du bassin. Trois parties se présentent : l'étude du milieu et des hommes (**CHAPITRE X**) ; la présentation des différentes ressources en eau du bassin et des activités de production (**CHAPITRE XI**) ; l'analyse d'une gestion intégrée des ressources en eau par bassin versant (**CHAPITRE XII**).

METHODOLOGIE DE L'ETUDE

La méthodologie s'articule autour de 4 phases de travail de recherche :

- 1) La formulation des objectifs et des hypothèses de recherche ;
- 2) La documentation et les enquêtes de terrain ;
- 3) Le traitement statistique des données ;
- 4) L'analyse des résultats, la synthèse et la rédaction.

L'approche géographique cherche à établir les interrelations eau-société dans leur dimension spatiale. Avec le support d'outils informatiques, et dans les relations eau-espace-société, on convient avec Maby Jacques, 2002¹ pour dire que « *l'objet géographique est un construit scientifique c'est-à-dire une création des procédures cognitives, où l'analyse de l'espace est étroitement associée aux faits sociaux, politiques, économiques, culturels qui contribuent à sa gestion* ». La carte, le tableau, la figure, le graphique et la photo constituent des instruments privilégiés de représentation de l'espace géographique ou des faits géographiques, parce qu'ils introduisent des questions mais surtout cherchent à résoudre des problèmes.

1. La recherche d'informations pour recueillir des données susceptibles d'étayer une argumentation, de défendre une hypothèse de recherche ou d'explorer un champ d'étude afin d'émettre des hypothèses de recherche selon Grawitz (2001, p.605)² a été la première démarche. Elle a permis une synthèse des caractéristiques physiques, humaines et socio-économiques de la zone d'étude. Cette recherche documentaire a permis de collecter des données de thèses, documents d'archives, articles, rapports scientifiques, administratifs ou de projets de développement.

Elle a été menée dans des Instituts et des Centres de Recherche de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, à la bibliothèque universitaire, à la salle de cartographie du Département de Géographie, au Département de Géologie, à la salle de documentation de l'Institut des Sciences de l'Environnement, au Centre de Documentation pour la Recherche Scientifique, à la bibliothèque de l'Institut Fondamental d'Afrique Noire (IFAN), à l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), à la salle de documentation du Centre de Suivi Ecologique (CSE), à la salle de documentation de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau (DGPRE), à l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), à la bibliothèque de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)... Nous avons aussi visité des sites internet (cf. bibliographie).

La revue bibliographique a permis d'asseoir la problématique de recherche, de discuter des concepts d'évaluation, de planification et de gestion des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique.

2. La collecte des données climatiques mesurées du bassin a été réalisée à l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), au Laboratoire d'Hydrologie et de Morphologie

¹ Maby J, 2003 : « Propositions liminaires pour éclairer le concept d'objet géographique » in *Indicateurs*, Éditions des Actes d'Avignon, 2003 n°5 316 p.

² Grawitz, M. 2001. *Méthodes des sciences sociales*. 11e édition, Paris, Dalloz, p.245-771.

du Département de Géographique, à la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau (DGPRE), à l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS). Une bonne partie des données climatiques, surtout celles provenant des parties malienne et guinéenne du bassin, sont empruntées à Sow A.A. (2007).

Les données hydrologiques utilisées dans cette étude ont été fournies respectivement par la Direction de Gestion et de Planification des Ressources en eau (DGPRE) et le l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS).

La collecte des données socio-économiques porte sur l'étude des interactions homme/milieu. Un questionnaire a été soumis aux personnes actives qui exploitent les ressources en eau du bassin pour comprendre les effets de la variabilité hydroclimatique sur les activités et les populations dans le bassin de la Falémé. La perception populaire demeure une approche intéressante, la seule analyse des statistiques disponibles reste insuffisante pour rendre compte de tous les effets de la variabilité climatique sur l'hydrologie de la Falémé et les relations entre l'eau et le développement des activités. Ces enquêtes ont été menées sur la base d'un échantillon de 294 chefs de ménage de la zone d'étude. C'est la technique d'enquête par sondage aléatoire simple qui est employée, les personnes interrogées étant choisies au hasard. Les villages retenus sont sélectionnés en fonction de leur localisation dans le bassin (proximité de la rivière, présence d'usagers de la ressource). Le focus groupe, la Méthode Active de Recherche Participative (MARP) avec les assemblées villageoises et le questionnaire écrit constituent le support de travail.

3. Enfin, le traitement statistique des données climatiques, hydrologiques et socioéconomiques s'est fait à partir d'outils informatiques modernes. Cette étape a permis de réaliser des tableaux, des figures et des graphiques. La pluviométrie est très largement analysée, compte tenu de son impact sur l'écoulement dans le bassin.

Pour caractériser la variabilité et la gouvernance des ressources en eau dans le bassin et répondre aux objectifs de régionalisation, pour que les résultats soient transposables aux autres sous bassins non observés dans le bassin du fleuve Sénégal, la création d'un Système d'Information Géographique (SIG) est nécessaire. Les données sont ainsi exploitées avec Arcview 3.2, Arcgis 9.3, Mapinfo 7.8, Surfer 8 pour le SIG et la cartographie. Des logiciels tels que Hydracces, S1stat, Kronostat 1.01, feuille (GD BHídrico 4,0, 2003 ont été utilisés lors du traitement des données hydroclimatiques ; la feuille GR2M sous Excel a permis la modélisation pluie-débit ; Excel a servi à effectuer les calculs des paramètres statistiques et dérivés, à faire des tableurs, des figures, etc. D'autres logiciels sont aussi utilisés dans cette étude : il s'agit, entre autres, d'Adobe Photoshop CS3, Adobe Illustrator 10 et de Paint pour l'amélioration des cartes et images, de VUE pour la conception d'organigrammes et de Sphinx pour le traitement des données qualitatives et quantitatives des enquêtes de terrain.

PARTIE I :

LE CADRE THEORIQUE DE LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU DANS UN BASSIN TRANSFRONTALIER

La première partie de la thèse est subdivisée en trois chapitres. :

CHAPITRE I : L'ANALYSE CONCEPTUELLE

CHAPITRE II : L'ÉTAT DES RECHERCHES ANTERIEURES SUR LES RESSOURCES EN EAU
DU BASSIN DE LA FALEME

CHAPITRE III : LES DONNÉES, LES OUTILS ET LES MÉTHODES DE L'ÉTUDE

Le principe d'une gestion transfrontalière des ressources en eau douce aborde les problèmes que posent les ressources en eau et les services y afférents dans le cadre d'une démarche intégrée qui considère le bassin comme une seule unité de gestion et de planification. De ce fait, la gestion intégrée des ressources en eau est également un outil de coopération transfrontalière, de dialogue et de création d'intérêts communs entre les Etats de chaque bassin, reliant entre elles plusieurs activités cruciales au sein d'un bassin international (Conseil de l'Europe, 8 avril 2004).

En philosophie, l'analyse conceptuelle consiste à dégager les conditions nécessaires et suffisantes de l'application des concepts pour déterminer leur signification et pour découvrir par le fait même l'essence des choses auxquelles ces concepts se réfèrent (Sockinging P., 1982)³. Ce chapitre fixe les différents concepts clés utilisés dans ce travail, il s'agit de : évaluation, ressource, gestion, gestion des ressources en eau, GIRE, variabilité hydroclimatique, modélisation.

1.1 Le concept d' « évaluation »

Le concept d'évaluation peut avoir plusieurs définitions différentes selon le contexte. Il est avant tout un mode de questionnement, une démarche d'analyse de l'action publique. L'évaluation ne dispose pas encore d'une terminologie spécifique faisant l'objet d'un large consensus. C'est un outil de connaissance, de quantification, de mesure.

De nombreuses définitions de l'évaluation ont été proposées. Evaluer signifie « porter un jugement sur quelque chose par référence à sa valeur supposée ou réelle. » ; c'est donc mesurer. La question de « la mesure » est posée : qui et quoi ? Cherche-t-on du quantitatif ou du qualitatif ? Stufflebeaum (1971) cité par Yoba B. (2004)⁴ ajoute à l'évaluation l'idée d'un processus qui permet de tracer, de collecter et d'offrir des informations utiles pour juger des décisions alternatives d'un outil mieux travaillé.

Pour Ladsous J.⁵, ce serait « *une estimation de la valeur, du nombre et de l'importance ou de la grandeur des choses.* ». La démarche évaluative cherche à identifier, mesurer et confronter. Le Conseil National de l'Evaluation (1996)⁶ fait distinguer quatre différentes finalités de l'évaluation pouvant avoir plus ou moins d'importance selon les cas considérés : une finalité "déontologique", une finalité de gestion, une finalité décisionnelle, une finalité d'apprentissage et de mobilisation.

En hydrologie, l'évaluation a comme objet les ressources en eau disponibles dans un espace. On appelle « évaluation des ressources en eau », pour citer Young *et al.* (1994)⁷, la détermination continue de leur emplacement, de leur étendue, de leur disponibilité et de leur qualité ainsi que des activités humaines dont elles subissent l'influence. Batchelor *et al.* (2005)⁸, quant à eux, y ajoutent une détermination future en la décrivant comme l' « *étude systématique de la situation actuelle et des tendances futures concernant tant les ressources en eau que les services d'approvisionnement en eau, l'accent étant mis en particulier sur la disponibilité, l'accessibilité et la demande* ». Qu'il s'agisse de

³ Sockinging P, 1982, Analyse Conceptuelle (Paris, INALCO-MSH, 1982), 26 p

⁴ Yoba B., 2004 : Montage et gestion participative des projets de développement rural, Outils et méthodes d'intervention, Mémoire de 3e Cycle en agronomie, Ecole Nationale d'Agriculture de Meknes (ENA), Meknes, 215 p.

⁵ Ladsous J. est un pédagogue français, inspirateur des "états généraux du social" ayant participé par ses écrits à la construction de l'identité de l'éducation spécialisée.

⁶ Conseil National de l'Evaluation (CNE), 1996: Petit guide de l'évaluation, Commissariat Général au Plan, 106 p.

⁷ Young, G.J., J.C.I. Dooge and J.C. Rodda, 1994: Global Water Resource Issues, Cambridge, Cambridge University Press, 194 pp.

⁸ Batchelor, M., Hopkins, K., Threlfall, E. J., Clifton-Hadley, F. A., Stallwood, A. D., Davies, R. H. & Liebana, E., 2005. bla_{CTX-M} genes in clinical Salmonella isolates recovered from humans in England and Wales from 1992 to 2003. Antimicrob Agents Chemother 49, 1319–1322.

la réduction des pertes causées par inondations, l'approvisionnement pour des besoins domestiques et industriels, l'atténuation des effets de la sécheresse et la protection des écosystèmes aquatiques..., l'évaluation des ressources en eau est capitale (Lins H. F., 2008⁹).

Young *et al.* (1994) énoncent plusieurs conditions indispensables pour asseoir l'évaluation des ressources en eau sur une base solide : un cadre institutionnel adéquat, un système efficace et peu coûteux de contrôle qualitatif et quantitatif des eaux, un système souple et moderne de stockage, d'extraction et de diffusion des données, la coordination et la hiérarchisation des activités, la constitution et le maintien d'une équipe qualifiée. Compte tenu de cette multiplicité des tâches à asseoir de façon systémique, l'évaluation des ressources en eau risque de devenir une démarche plutôt théorique car « quasi-impossible » à réaliser. Pourtant, la réaliser est nécessaire, vu le contexte mondial de l'eau marqué par une variabilité hydroclimatique. Elle est donc une condition préalable indispensable à une mise en valeur durable et à la gestion rationnelle de l'eau dans le monde.

Les points de vue sont nombreux et on retient, en rapport avec cette étude, la définition émise par l'Organisation Météorologique Mondiale (1994)¹⁰ : l'évaluation des ressources en eau est la détermination de leurs sources, de leurs étendues, de leur vulnérabilité et de leur qualité, pour évaluer les possibilités de leur utilisation et de leur gestion.

- ❖ Dans le cadre de ce travail, l'évaluation est perçue comme une mesure de la quantité des ressources en eau ou son recensement. Aussi, elle indique la variabilité hydroclimatique des ressources en eau dans le bassin, décrit la situation quantitative du bassin (pluies efficaces, débits du cours d'eau, niveau de soutien des nappes d'eau souterraine,) et fournit une information synthétique sur la satisfaction des besoins des usages par rapport aux disponibilités saisonnières.

1.2 Le concept de « ressource »

Une ressource peut être définie, selon Robert (1973)¹¹, comme : "*ce qui peut fournir de quoi satisfaire un besoin, améliorer une situation*". Mais le concept de ressource a connu une évolution au fil des années. Les ressources ont le sens d'une offre potentielle à évaluer suivant les critères relatifs aux besoins ou demandes. Le concept de ressource allie les "revenus" et les "réserves", ce qui aura des implications sur celui de ressource en eau.

Dans le domaine de l'eau, le concept de « ressource » est apparu avec la prise de conscience de sa rareté et de la nécessité de l'évaluer précisément pour la gérer au mieux. Cependant, "*les ressources en eau ne sont pas aisément définissables dans l'absolu, elles ne peuvent se définir que par rapport à des*

⁹Lins H. F., 2008 : Evaluation des ressources en eau: un impératif, Bulletin de l'OMM 57 (3), Juillet 2008/159, http://www.wmo.int/wcc3/bulletin/57_3_en/57_3_lins_fr.html#top, consulté 21/08/2011

¹⁰ OMM, 1994. Acquisition et Traitement des données, Analyses, Prévision et autres applications. Guides des pratiques Hydrologiques. OMM-N° 168, Organisation Météorologique Mondiale, Genève (Suisse): 829 p.

¹¹ <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICRESSO.HTM>, consulté le 10/05/2011

besoins, qui imposent des contraintes de quantité, qualité et coût" (Gleizes C. 1977¹²). Pour cela, des ingénieurs et économistes ont identifié alors la ressource en eau comme l'ensemble des « eaux naturelles » dont l'évaluation au sein du bassin hydrographique, donnée par le bilan hydrologique avec comme entrées les précipitations et comme sortie les écoulements, doit s'effectuer dans le sous-système « eau ». Sur ce, Reynard E. (2000)¹³ dissocie trois types de ressources : « (i) la ressource théorique qui constitue la part du système « eau » potentiellement exploitable en dehors de toutes contraintes politiques, techniques... ; (ii) la ressource en eau potentielle qui est la part de la ressource théorique exploitable en tenant compte des contraintes extérieures au système ; (iii) et la ressource en eau possible ou exploitable qui va dépendre des choix des acteurs en présence en fonction de la possibilité effective de mobiliser et de maîtriser cette ressource. »

Son premier type de ressource reste rejeté par certains du fait qu'il n'est pas « possédé » par l'homme, contrairement aux deux autres et en particulier le dernier, qui sont plus acceptés. Cela fait dire à Charnay B. (2010)¹⁴ qu' « une eau de surface ou souterraine ne devient ressource que s'il est possible techniquement, économiquement et écologiquement de l'exploiter tout en la maîtrisant et en la préservant ».

Au sens strict, on peut donc définir la ressource en eau comme l'eau dont dispose ou peut disposer un utilisateur ou un ensemble d'utilisateurs pour couvrir leurs besoins. Ainsi n'est ressource en eau qu'une partie limitée des quantités disponibles. Mieux encore, sur cette infime partie des quantités disponibles, il est essentiel de distinguer plusieurs types de ressources en eau dont les caractéristiques (disponibilité, quantité, qualité..) sont différentes. C'est pourquoi, même si la ressource en eau a bien le sens d'une offre, réelle ou potentielle, rencontrée par une demande en eau, il ne faut pas privilégier sa dimension quantitative et en négliger d'autres pouvant servir à la définir et à l'évaluer (Margat J. 1995¹⁵).

Comme les eaux offertes aux utilisations humaines proviennent du milieu naturel, les hydrologues tendent à identifier les ressources en eau (le plus souvent au pluriel) aux occurrences d'eau dans la nature et plus particulièrement aux eaux douces continentales, objet de l'hydrologie. Beaucoup de publications ou monographies hydrologiques emploient le terme « ressources » dans ce sens, peut-être pour transposer, plus ou moins consciemment, à l'hydrologie l'utilité attribuée à l'eau. L'idée de Chéret Y. (1967)¹⁶ en constitue une référence : "*L'inégale répartition des pluies dans l'espace et dans le temps provoque des variations considérables des ressources en eau suivant les endroits ou les moments*".

¹² Gleizes (1977) : Les ressources en eau, Génie Rural, Nov-Déc 1977, pp 24-34.

¹³ Reynard E. 2000 : Cadre institutionnel et gestion des ressources en eau dans les Alpes : deux études de cas dans des stations touristiques valaisannes. *Revue Suisse de Sciences Politiques*, Vol 6, n° 1, pp 53-85.

¹⁴ Charnay B., 2010 : *Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de Montagne : le cas du bassin versant du Giffre*, Soutenue le 26 mars 2010, Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Savoie (E.D. SISEO), 504 p

¹⁵ Margat J. 1995 : Ressource en eau, <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICRESSO.HTM>, consulté le 15/12/2011

¹⁶ Chéret I., 1967 : L'Eau (Société, 20), Paris, Le Seuil, 1967, un vol. in-8°, 128 p.,

Dans une large acception, la ressource en eau conserve le sens d'une offre de la nature, d'un potentiel à concevoir suivant de multiples dimensions spatio-temporelles évaluées suivant les critères d'utilisation, sauf que les utilisations des eaux de la nature sont nombreuses et variées. Le concept de ressource en eau inclut la prise en vue des différents usages, voire leur utilisation in situ, mais renferme aussi des limites. La ressource en eau est ainsi indissociable de la conception de l'eau, à la fois comme bien économique et comme bien d'environnement. C'est pourquoi sa définition est inséparable de l'analyse d'un hydrosystème, en relation avec les activités humaines.

- ❖ Dans le cadre de ce travail, la ressource en eau comprend, au sens large, toutes les eaux du bassin accessibles comme ressources, utiles et disponibles pour l'homme et les écosystèmes. Elle renvoie donc à l'étude de la situation hydrologique dans le bassin, notamment dans la relation eau-espace-société, ces ressources en eau du bassin étant inégalement réparties dans l'espace et dans le temps.

1.3 Le concept de « gestion »

Le terme « gestion » trouve son origine dans le mot latin *gerere*, « porter, administrer, faire, exécuter ». Dans les dictionnaires, la gestion est l'action d'administrer une collectivité, une entreprise, etc., pour le compte d'un tiers ou pour son propre compte. Toutefois, la définition de la gestion de l'eau a évolué au fil du temps.

Rapporté au bassin versant, le concept de gestion renvoie à un nouveau concept : « la gestion par bassin versant », avec le bassin représentant ici le système à gérer. Si les populations locales dans un bassin versant sont préoccupées par le fait qu'une diminution des ressources en eau équivaut souvent à une diminution des bénéfices économiques qui y sont généralement associées, la gestion par bassin, dont le but est d'entreprendre des projets de réhabilitation, devient une réalité chez les usagers. Il permet de trouver une meilleure relation entre la conservation de l'environnement et le développement économique. Cependant, la notion de gestion du système bassin versant met l'accent sur une unité spatiale plutôt que sur un usage et s'oppose à la notion de gestion sectorielle.

Bref, la gestion par bassin versant est une approche de gestion intersectorielle des ressources en eau, des eaux et des infrastructures qui leur sont liées. Elle poursuit des objectifs à long terme et se déroule en processus cycliques de conception, de mise en œuvre et de surveillance dont le périmètre de référence est le bassin versant. L'approche par bassin versant dans la gestion est de loin la meilleure méthode pour agir efficacement tout en respectant les capacités de l'environnement dans un contexte socio-économique viable (Arseneau E., 2004¹⁷).

¹⁷ Arseneau E. : Le concept de gestion par bassin versant, nouvel outil de gestion socio-économique, Groupe de surveillance du bassin de la Petitcodiac (PWMG-GSBP Inc.) Juin 2004

- ❖ Dans le cadre de ce travail, la gestion permet d'appréhender l'hydrosystème dans son ensemble. Cette gestion par bassin prend en compte tout ce qui se passe dans le bassin versant, incluant autant le milieu naturel que les activités humaines. En ce sens, sols, végétation, animaux et êtres humains en font partie. Elle renvoie d'abord à une gestion des impacts (prélèvement, pollution), mais aussi à une gestion des risques climatiques (sécheresse et inondations).

1.4 Le concept de « gestion des ressources en eau »

Ce concept rassemble deux expressions : Ressource en eau et Gestion. La gestion des ressources en eau veut dire que toutes les différentes utilisations des ressources en eau sont prises en compte ensemble. Les attributions et les décisions de gestion de l'eau prennent en compte les effets de chaque utilisation sur les autres. La gestion des ressources en eau devient donc un impératif vital pour la survie des êtres vivants de notre planète du fait que le stock d'eau douce planétaire existant est petit et de plus, il est en danger. Cette eau douce, pourtant précieuse, est largement gaspillée et polluée. Peu à peu, celle-ci se raréfie. Au fil des années, sa qualité diminue, tandis que son prix augmente.

Pour quelles raisons devons-nous gérer nos ressources en eau ? La réponse est simple. Les divers utilisateurs de cette ressource se disputent les réserves d'eau existantes afin de satisfaire leurs besoins essentiels, d'alimenter le développement économique, de soutenir le milieu naturel et de pouvoir pratiquer des activités récréatives¹⁸. Il est nécessaire de concilier ces besoins divergents et de promouvoir une utilisation tenant compte des avantages sociaux, économiques et environnementaux liés aux ressources en eau.

En hydrologie, la gestion des ressources en eau renvoie aux ressources mobilisables généralement définies comme la fraction des eaux du milieu qu'il est physiquement et techniquement possible de maîtriser. Klemes (1975)¹⁹ en donne indirectement une excellente définition, quoiqu'il les nomme ressources exploitables : « *Pour la gestion des ressources en eau, la tâche fondamentale de l'hydrologie consiste à fournir les données sur la répartition dans le temps et dans l'espace de la partie des eaux superficielles qui est directement exploitable, c'est-à-dire qu'on peut redistribuer par barrages, canaux, canalisations, pompes et autres ouvrages ou machines.* ».

- ❖ Dans le cadre de ce travail, la gestion des ressources obéit à deux principes :
 - Améliorer l'environnement naturel (ressources en eau, milieux aquatiques...);
 - Assurer le bon fonctionnement des activités liées à l'eau (gérer les inondations et les sécheresses ; lutter contre l'érosion).

¹⁸ <http://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=DF9EE875-1>, consulté le 10/09/2011

¹⁹ Klemes, V. (1975). Applications de l'hydrologie à la gestion des ressources en eau (au niveau de la planification et de la conception). Hydrologie opérationnelle Rapport N°4 - OMM N°356, OMM : Organisation Météorologique Mondiale: 121 p.

1.5 Le concept de « GIRE »

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est un outil flexible qui permet de s'attaquer aux défis de l'eau, un « *processus qui vise l'exploitation et la gestion coordonnées de l'eau, des terres et des ressources associées, afin de maximiser d'une manière équitable le bien-être économique et social, sans compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux* » (Technical Advisory Committee, 2000²⁰).

Pour caractériser le concept de GIRE, le Global Water Partnership (2004) renforce la définition énumérée par TAC, 2000. Pour le GWP, la GIRE n'est pas un but en elle-même, c'est un « *outil qui permet de s'attaquer aux défis de l'eau et d'optimiser la contribution de l'eau au développement durable. Elle consiste à renforcer des cadres pour la gouvernance de l'eau afin d'encourager des prises de décision appropriées en réponse à des situations et des besoins changeants* ». Quant à l'Office International de l'Eau (OIEAU, 2001), elle lui reconnaît trois fonctions principales : « *(i) la satisfaction des besoins rationnels et légitimes des différentes catégories d'utilisateurs, en cohérence avec un aménagement approprié des territoires de bassin, (ii) la préservation durable des ressources et des écosystèmes liés à l'eau, (iii) la protection contre les risques d'inondation, sécheresse, érosion* ».

Toutefois, la GIRE ne concerne pas seulement la gestion des ressources physiques, elle implique la réforme des systèmes humains pour permettre aux individus de retirer les bénéfices de cette ressource. Une des particularités de la GIRE est l'intervention rendue nécessaire des parties prenantes pour la prise de décision sur l'utilisation des ressources d'un territoire car les utilisateurs sont ceux qui connaissent le mieux leurs besoins (Petch, 1985²¹). La GIRE est donc un processus systématique pour le développement durable, l'attribution et le suivi de l'utilisation des ressources en eau dans le contexte des objectifs sociaux, économiques et environnementaux (GWP, 2005) et nécessite une approche systémique de gestion de l'eau prenant en compte les effets de chaque utilisation sur les autres.

Pour la DGPRES (2007)²², dans un processus de GIRE, « *les ressources en eau sont gérées de manière efficace, judicieuse et durable, de façon à ce que l'accès à l'eau potable salubre permettant de satisfaire les besoins essentiels, l'accès à des installations sanitaires, la sécurité alimentaire, le recul de la pauvreté, ainsi que la protection de la santé humaine et de la biodiversité des écosystèmes terrestres et aquatiques soient une réalité pour tous les habitants d'une région* ».

En définitive, la GIRE représente l'ensemble des actions permettant de trouver un équilibre optimal entre les approvisionnements en eau et les demandes, dans un hydrosystème indiqué et à un instant donné.

²⁰ TAC. (2000): Global Water Partnership (GWP), Technical Advisory Committee (TAC): La gestion intégrée des ressources en eau 2000, TAC Background Papers No. 4, 65p. Web : www.gwpforum.org/gwp/library/TAC4fr.pdf.

²¹ Petch A., 1985 : La planification de la gestion intégrée en Alberta. Ottawa: Environnement Canada, Direction de la politique et de la recherche sur l'utilisation des terres. Documents n°43.

²² Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau, 2007 : Projet de mise en œuvre du plan d'action GIRE du Sénégal, Rapport d'évaluation, Facilité Africaine de l'Eau (FAE), 39 p

❖ Dans cette présente étude, la GIRE prend en compte les besoins en eau pour le milieu physique et pour toutes les activités liées à l'eau. Elle est un processus qui encourage la mise en valeur et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et de toutes les ressources connexes, dans le souci d'accroître le bien-être socio-économique qui en résulte, d'une manière équitable et de façon durable.

Elle a pour but d'assurer le **partage** (entre les différents usagers et les différents pays se partageant le bassin) et l'**équilibre** des ressources en eau (entre disponibilité annuelle, usagers ; ressources en eau et environnement ; valeur sociale et économique ; ressources en eau actuelles et futures) de façon **concertée** et **durable**.

1.6 Le concept de « variabilité hydroclimatique »

Le concept de variabilité hydroclimatique est composé de deux notions : variabilité pluviométrique et variabilité hydrologique. La plupart du temps, on a tendance à confondre variabilité climatique et changements climatiques, tous deux renseignant sur l'évolution du climat, mais n'ayant pas la même signification (ENDA et CIAT, 2005²³).

La variabilité climatique est une caractéristique inhérente au climat qui se manifeste par des changements et des déviations dans le temps (IPCC, 2007²⁴). Le degré de variabilité climatique peut être décrit par les différences entre les valeurs moyennes à long terme des paramètres climatiques (pluie, température, humidité, durée des saisons) et les valeurs observées prises à différentes échelles temporelles et spatiales (ENDA et CIAT, 2005). Ainsi la variabilité climatique est une modification naturelle du climat ; elle est donc indépendante des activités humaines.

Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, 1992), la variabilité climatique se réfère à la variation naturelle intra et inter-annuelle du climat, alors que les changements climatiques désignent un changement du climat attribué directement ou indirectement aux activités humaines qui altèrent la composition de l'atmosphère globale et qui s'ajoutent à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables.

Les changements climatiques sont également définis comme toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines (IPCC, 1996). La variabilité climatique fait appel à l'étude de la vulnérabilité actuelle, alors que le changement climatique fait appel à l'étude de la vulnérabilité future (ENDA et CIAT, 2005). Ces deux types de vulnérabilité permettent d'évaluer les risques connus, mais avec des objectifs différents.

²³ ENDA et CIAT (Winograd, M.). 2005. Vulnerability and Adaptation Training and Capacity Building Activities and Tools. Climate change capacity development (C3D) Project (Mind, Sri Lanka, ENDA, Senegal and ERC, South Africa with UNITAR), Side Event, COP 11 Conference, December 6, Montreal, Canada.

²⁴ IPCC : International Panel on Climate Change

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 1995²⁵) considère le changement climatique comme une variation à long terme du climat, qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle. Il est complété par Niasse *et al.* (2004)²⁶ qui définissent la notion de variabilité et de changements climatiques comme la modification ou variation significative du climat, qu'elle soit naturelle ou due aux facteurs d'origine anthropique.

La variabilité climatique, lorsqu'elle se traduit par de longues périodes de sécheresse ou d'excès d'eau, a des conséquences pouvant être durables sur le cycle de l'eau. Cette variabilité hydrologique représente toutes les variations du débit d'un bassin, en fonction de son extension, de la pluviométrie et du type d'aquifères déterminant les infiltrations et les relations avec les eaux de surface.

❖ Dans le cadre de la présente recherche, les précipitations sont l'élément du climat que nous avons utilisé pour traiter de la variabilité pluviométrique. L'objectif est de montrer l'impact de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau du bassin versant de la Falémé. La variabilité et les changements climatiques sont définis dans le présent document comme la modification ou variation significative du climat et son corollaire la variabilité hydrologique.

1.7 Le concept de « modélisation »

Le terme de modélisation apparaît en France dans les années 1970 avec le livre « *la théorie du système général, théorie de la modélisation* » de Le Moigne. Pour Volle M. (2004)²⁷, un modèle est une représentation mentale d'un objet du monde réel et de son fonctionnement. Il est donc synonyme de théorie, mais avec une connotation pratique, une théorie orientée vers l'action qu'elle doit servir. Modèle ne se confond pas avec théorie, pour évoquer Thomas Kuhn (1972) cité par Gumuchian H *et al.* (2000)²⁸ : « *Les termes de modèle et de théorie sont parfois utilisés l'un pour l'autre, il n'en est rien : le critère d'évaluation d'une théorie est sa validité ; celui du modèle est son utilité* ».

Selon le Berre *et al.* (1997) « *la modélisation peut-elle être envisagée comme un moyen d'élaboration de la connaissance scientifique sur l'espace et un moyen de réflexion sur cette connaissance* »²⁹. Toutefois, dans la culture scientifique, la notion de modélisation a depuis été largement restreinte. Ainsi le terme de modélisation signifie de plus en plus, selon Ekeland (1995)³⁰, « *programmation à des fins de simulation d'un modèle présumé, donné, sans que l'on s'attache particulièrement à l'examen de l'élaboration et de la justification de ce modèle* ».

²⁵ GIEC, 1995, Seconde évaluation du GIEC: changement de climat 1995 (Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 64 p.

²⁶ Niasse, M., A. Afouda et A. Amani, 2004, Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation, UICN, Gland (Suisse) et Cambridge (Royaume Uni), 71 p.

²⁷ Volle M, 2004 A propos de la modélisation, <http://www.volle.com/travaux/modelisation2.htm>

²⁸ Gumuchian H. Marois C. Fèvre V., 2000 : *Initiation à la recherche en géographie. Aménagement, développement, territorial, environnement*, ed Economica, Les presses universitaires de Montréal, 425 p.

²⁹ Le Berre, Brocard, 1997 : « *Modélisation et espace* », pp 3-9 in « Espace, Territoires et Sociétés. Les recherches françaises en perspectives », Paris, Colloque CNRS, Section 39, 3 nov-1997.

³⁰ Ekeland, I. 1995 : *Le Chaos*, Flammarion - Dominos.

L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter a posteriori une réponse « satisfaisante » aux questions qu'on s'est posées a priori à propos de l'objet modélisé. Il est important de garder à l'esprit qu'un modèle n'est rien d'autre, pour reprendre les termes de Bouleau (1999, p. 301)³¹, « *qu'un simulacre utile, une représentation partisane* ».

Pour les bassins versants, les modèles hydrologiques sont classés en trois catégories : empiriques, conceptuels et distribués. La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau et à l'une des facettes du risque hydrologique. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est censée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion du bassin.

Un modèle hydrologique n'est qu'une simplification d'un système complexe (Payraudeau, 2002³²). A chaque stade de la modélisation, des approximations sont réalisées : perception du phénomène, formalisation en un cadre conceptuel, traduction dans un cadre de programmation (Ambroise, 1999³³). Le modèle hydrologique parfait, pouvant s'appliquer à toutes les échelles de temps et d'espace, n'existe pas, mais les efforts accomplis dans l'amélioration et le perfectionnement des modèles permettent, aujourd'hui, de mieux cerner les différentes phases du cycle de l'eau et de mieux les modéliser.

- ❖ Dans le cadre de ce travail, la modélisation permet de calculer le débit, d'étudier, d'apprécier et de prévoir les phénomènes extrêmes de l'écoulement (crues et étiages) et la variabilité climatique dans le bassin de la Falémé.

Conclusion partielle

L'analyse conceptuelle a répondu à un souci essentiel : les données dont on doit disposer pour l'application et les traitements à effectuer. Cette analyse résulte de l'observation de la réalité que l'on a cherché à traiter. L'ensemble des données concernant une même catégorie d'individus ou d'objets sont regroupées dans des concepts. Après l'analyse des différents concepts clés utilisés dans ce travail (il s'agit de : évaluation, ressource, gestion, gestion des ressources en eau, GIRE, variabilité hydroclimatique, modélisation), une synthèse des travaux antérieurs dans le bassin de la Falémé semble nécessaire.

³¹ Bouleau, N. (1999), *Philosophies des mathématiques et de la modélisation – Du chercheur à l'ingénieur*. L'Harmattan, Paris, France. 5, 23, 24.

³² Payraudeau, S., 2002 : *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants Méditerranéens*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF). Montpellier, France: 436 p.

³³ Ambroise, 1999, *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant*.

La recherche documentaire nous a permis de dresser un état des lieux de la production scientifique sur les ressources en eau face à la variabilité ou aux changements climatiques. Le présent bilan fait une synthèse des travaux antérieurs dans le bassin de la Falémé. La démarche privilégiée dans cette recherche documentaire a consisté à la consultation d'ouvrages généraux et spécifiques, et d'articles scientifiques portant sur les rubriques suivantes :

- Sur le bassin de la Falémé (l'état de la recherche sur la Falémé) ;
- Sur la variabilité hydroclimatique ;
- Sur la modélisation hydrologique.

II.1 L'état de la recherche sur le bassin de la Falémé

Le recensement bibliographique des divers travaux dans le bassin de la Falémé ou ses environs immédiats ayant un rapport avec l'objet de la dite étude est axé sur plusieurs domaines :

1. Sur le climat du bassin versant de la Falémé et ses environs

Les travaux de **Leroux M. (1983)** portant sur « *Le climat de l'Afrique Tropicale* » ; **Sagna P. (2000 ; 2005)** caractérisent le climat dans toute la zone de l'Afrique de l'Ouest.

Ndiaye A, (1994) dans « *Les Paramètres de l'Environnement et la pluviogénèse à travers un Système d'Information Géographique Application à l'hivernage 1990 au Sénégal*, analyse l'hivernage 1990 à travers tout le territoire du Sénégal en montrant le degré d'impact des paramètres de l'environnement sur la pluviogénèse.

Ndione J.A. (1995) : « *Contraintes et Evolution Climatiques Récente du Sénégal oriental : Impacts sur le Milieu Physique* » caractérise la sécheresse au Sénégal oriental en indiquant la baisse plus prononcée dans le socle à l'Est. Ainsi, poursuit-il, « *les fleuves et rivières se caractérisent par une irrégularité dans leur alimentation, une insuffisance des crues et un arrêt total de l'écoulement* ».

Dione O. (1996) : « *Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie* » a évoqué la pluie dans ses différentes caractéristiques à travers son évolution dans le temps et dans l'espace ainsi que sa péjoration, sa baisse généralisée dans la région depuis plus de trois décennies du fait de la sécheresse.

Sow A, A. (2007) : « *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé* » détecte une rupture dans les séries pluviométriques en 1969,

caractérise les déficits pluviométriques et confirme l'existence d'une péjoration climatique sur la période 1970-1990.

La plupart des auteurs ont détecté une tendance à la baisse dans les séries pluviométriques ouest-africaines, ce qu'on essaiera d'approfondir dans notre domaine d'étude. Mais, quel serait l'impact de ces modifications sur le rythme hydrologique ? Les études suivantes nous permettront de mieux le cerner.

2. Sur l'hydrologie et les questions de l'eau (étude hydrologique)

Rochette (1974) : « *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal* », indique les facteurs du régime et montre que dans le haut bassin du fleuve Sénégal, les facteurs physiques permettent un écoulement rapide des eaux de pluie reçues. Au plan climatique, il situe le bassin du Sénégal entre les régions tropicales et les confins du Sahara avec le Sud (bassin supérieur) largement plus arrosé que le reste du bassin. « *Les ¾ du Bafing, de la partie supérieure du bassin du Bakoye et de la Falémé sont situés en deçà de 1500 mm qui limitent le domaine tropical de transition ou l'écoulement est important* ».

Dione O. (1991) : « *Écoulement, crue et étiage dans le bassin versant de la Falémé* » analyse deux phénomènes normaux, mais particuliers : les crues et les étiages, et affirme que « *les paramètres physiques et climatiques qui agissent sur l'écoulement déterminent des contrastes, avec de grandes crues et des étiages profonds, d'où une variation saisonnière des disponibilités en eau de surface* ».

Pour les hauts bassins, **Dione O. (1996)** : « *Évolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie* » explique, à partir des paléoclimats, les causes possibles de la situation climatique actuelle, la relation pluie-écoulement et détermine les ressources en eau de surface dans un contexte de péjoration pluviométrique.

Sougou A. (1996) : « *Les sécheresses climatiques et les étiages fluviaux au Sud-est du Sénégal oriental* » analyse les conséquences de la sécheresse dans le Sud-est du Sénégal en traitant de l'évolution climatique récente marquée par une baisse de la pluviométrie. Pour lui, cette péjoration du climat accentue les étiages fluviaux soutenus par les faibles réserves souterraines du socle.

Labou A. (1996) : « *Les disponibilités en eau dans le Sud-est du Sénégal* » évalue les disponibilités en eau à trois niveaux : eaux de pluie, eaux de surface et eaux souterraines. Elle indique d'abord l'abondance de la pluviométrie dans le Sud et sa baisse progressive vers le Nord, ensuite la faiblesse des eaux souterraines et l'importance des eaux de surface qui contribuent à 27 % du fleuve Sénégal.

Sow A.A. (1988) : « *Écoulement et indices de sécheresse dans le bassin du Niokolo Koba* » évoque l'impact de la sécheresse, définie par une diminution des précipitations, sur l'écoulement dudit bassin.

Il donne la relation entre la sécheresse climatique (déterminée par des déficits pluviométriques) et celle hydrologique dont la plus importante manifestation reste l'arrêt de l'écoulement.

Sow A. A. (2007) : « *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé* » met en évidence l'impact des déficits pluviométriques sur l'écoulement des bassins de la Gambie et de la Falémé. Il analyse le régime des cours d'eau et indique les grandes disponibilités en eau de surface sur ces espaces, avec 80 à 90 % écoulés en 3 ou 4 mois. Il montre la sévérité des étiages dans tous les domaines climatiques, d'où la vulnérabilité des bassins. Il propose enfin leur gestion et aménagement pour une éventuelle satisfaction des usagers par année.

3. Sur le milieu et la gestion des ressources

Coulibaly A. (1995) : « *Milieu naturel et contraintes d'occupation dans la partie sénégalaise du bassin versant de la Falémé* » fait ressortir les contraintes du milieu naturel et celles de l'occupation dans la partie sénégalaise du bassin versant de la Falémé. Il indique l'ensemble des ressources dont dispose la Falémé, mais aussi les nombreuses contraintes de chacune d'elles.

Le Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (1997) : « *Plan d'action pour le développement de la région de Tambacounda* » montre les difficultés d'approvisionnement en eau et explique la persistance des maladies par l'utilisation des eaux de la rivière comme eau de boisson sans traitement au préalable, ce qui constitue de réels dangers.

Keita B. (1999) : « *Agriculture et Orpaillage dans la Communauté Rurale de Saraya, Complémentarité ou Compétition* » indique les interrelations entre agriculture et orpaillage, en analysant leur complémentarité ou leur concurrence.

Touré B. (2002) : « *Monographie de la communauté rurale de Gathiary : arrondissement de Kéniéba* » s'intéresse précisément à la communauté rurale de Gathiary. Dans cette localité, l'auteur fait l'état des potentialités que recèlent les ressources naturelles, passe en revue toutes les activités et montre les difficultés liées à l'enclavement, l'éloignement de la CR et le désintérêt de l'Etat.

Seye F. (2005) : « *Monographie de la Communauté Rurale de Sadatou, Arrondissement de Kéniéba*, » procède d'abord à une description du milieu physique, de ses ressources naturelles et des activités qui s'y pratiquent. Elle montre l'encombrement de l'exploitation des ressources par l'enclavement de la CR, mais aussi le rôle de la transhumance dans la dégradation de l'environnement naturel.

Tropica Environmental Consultants (2006) : « *Etude d'impact environnemental et social du projet d'exploitation d'or, d'argent et de substances connexes de Sabodala* » réalise une étude d'impact environnemental et social pour le projet d'exploitation d'or et de substances connexes de Sabodala, dans l'intention d'apprécier ses conséquences positives ou négatives, directes ou indirectes.

OMVS, Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal (2007) dans « *Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du Fleuve Sénégal* » indique les défis environnementaux à relever dans le bassin du fleuve Sénégal.

OMVS, Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal (2008) : « *Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problèmes Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal* » définit les domaines prioritaires d'action et les réformes nécessaires pour résoudre les problèmes environnementaux les plus urgents identifiés dans le bassin, proposer les actions et mesures prioritaires en vue de les résoudre, identifier les rôles et responsabilités des différents acteurs pour la réalisation des actions.

Tropica Environnemental Consultants (2008) : « *EIES Pipeline Eaux Falémé SMC, Rapport d'audience publique dans le cadre de l'étude d'impact environnemental du projet d'installation et d'exploitation d'une conduite de pompes d'eau de la Falémé vers la mine de la Sabodala Mining Company* » réalise cette étude pour conformer le projet d'installation et d'exploitation d'une conduite de pompage d'eau vers la mine de Sabodala, en indiquant les impacts positifs comme négatifs.

USAID (août 2010) : « *Convention Locale : Plan d'Occupation et d'Affectation des Sols de la communauté rurale de Missirah Sirimana* » montre comment la Convention Locale est un ensemble de consensus établis par les populations de la Communauté Rurale de Missirah Sirimana afin de gérer de manière rationnelle et durable leurs ressources naturelles, et de prévenir les éventuels conflits.

4. Sur la géologie, la géomorphologie et les autres facteurs stables de l'écoulement

Du point de vue géomorphologique, **Michel P (1973)** : « *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique* » situe le bassin dans une région où affleurent les formations sédimentaires anciennes du socle et celles récentes. **Bertrand R et Valenza J (1977)** ont étudié la « *Méthode de cartographie des milieux naturels du Sénégal oriental* ». Selon eux, les glacis seraient développés au Quaternaire ancien et moyen. D'autres auteurs comme ont traité de la géologie du bassin. C'est le cas de **Labou (1996)** qui y distingue trois formations géologiques anciennes et complexes (sédimentaires, éruptives et métamorphiques) localisées dans le domaine du socle. **Sylla M. (1992)** étudie le minerai sulfure aurifère de Sabodala, dans le cadre de la minéralogie et des traitements par voies physiques et chimiques.

Dans le domaine de l'hydrogéologie, le **Bureau de Recherches Géologiques et Minières (1962)** : « *Rapport d'étude hydrogéologique de la région de Kédougou-Bakel* » permet une reconnaissance hydrogéologique préliminaire de la région de Kédougou-Bakel. **Diouf S. (1999)** consacre son étude à l'hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien de Saraya et ses environs dans le cadre de la localisation et la caractérisation des aquifères du batholite.

Du point de vue pédologique, **Pereira B. S. (1966)** a établi une carte pédologique du Sénégal à l'échelle 1/200000. En 1974, **Hanrion C. et Mercky P.** ont réussi à réaliser une carte d'aptitude des terres à l'échelle de 1/40000. Ils identifient plusieurs types de sols dans la zone dont les plus importants sont les sols régosoliques, les lithosols et les sols ferrugineux lessivés à taches et à concrétions ferrugineuses. **Feller C et Milleville P (1977)**, quant à eux, étudient les caractéristiques physico-chimiques des sols.

Du point de vue de la végétation, **Diaouné A (1982)** a étudié les formations végétales de la zone marquées par deux types de formations végétales : une forêt claire et une savane arbustive.

5. Sur la modélisation, rares sont les travaux qui sont aussi réalisés dans le bassin de la Falémé et ses environs :

Cissé S. (2009) : « *Etude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Falémé en amont de Kidira. Application du modèle hydrologique distribué SWATT* » réalise la modélisation hydrologique à l'aide des données météorologiques disponibles (pluie et ETP journalières), suivi d'un calage des paramètres du modèle à l'aide des données de débits (observés et simulés).

Sambou et al, (2011) : « *Calage et validation des modèles hydrologiques GR4J et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafing-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressources en eau de la retenue de Manantali* » analysent les paramètres des modèles à pas de temps journaliers GR4J et mensuels GR2M du CEMAGREF dans le bassin versant du Bafing en amont de Bafing Makana.

Ces nombreuses références bibliographiques prouvent le regain d'intérêt de la recherche sur la Falémé et ses environs. Parmi elles, certaines sont orientées sur le déficit pluviométrique et la récurrence de la sécheresse qui expliquent la diminution des ressources en eau et donc du volume écoulé dans le bassin.

II.2 Sur la variabilité hydroclimatique

L'objectif de ces rappels est de présenter la mémoire du savoir acquis sur le contexte déficitaire actuel de la ressource en eau en zone intertropicale africaine, La plupart des auteurs ont bien analysé la variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans les bassins versants africains. La sécheresse qui sévit en Afrique Occidentale et Centrale depuis plus de trois décennies, tel un thème lancinant, a préoccupé de nombreux auteurs hydrologues, climatologues, environnementalistes et autres. La tentation de "prévoir le futur dans les archives du passé" et la volonté de faire progresser la connaissance expliquent, sans aucun doute, les nombreuses contributions que le sujet a suscitées.

Toutes les études d'**Ouédraogo (2001)**, **Ardoin (2004)** sont unanimes pour dire que les cumuls pluviométriques annuels des décennies 1970 et 1980 se caractérisent par une diminution sensible de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest. Plusieurs travaux de **Nicholson (1980, 1981, 1986)** fournissent

une première vision de l'ensemble de la variabilité spatiotemporelle des précipitations en insistant sur la régionalisation et la persistance de la récente sécheresse.

Hubert et Carbonnel (1987), Demarée et Nicolis (1990), Lubès *et al.* (1995) analysent l'évolution chronologique des données non plus en termes d'évolution progressive et linéaire d'une situation excédentaire vers une autre déficitaire, mais en termes de transition brusque d'un état climatique vers un autre. Ils montrent que la séquence pluviométrique 1970-1980 est statistiquement différente de la séquence 1931-1969 sur l'ensemble du Sahel.

Les travaux de **Sircoulon et Olivry (1986), Mahé G., Olivry J.C. (1995), Mahé (1992), Olivry *et al.* (1994), Bricquet *et al.* (1996), Servat *et al.* (1998), Servat *et al.* (1999)** montrent comment la persistance de la sécheresse a fait naître une nouvelle voie de recherche. Ils se sont attardés sur des aspects quantitatifs, en évaluant les déficits d'une période ou d'une année par rapport à une situation précédente.

Mahé G., Olivry J.C. (1995) ont montré que les variations des précipitations et les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale sont liées aux flux d'humidité associés à la mousson et à l'alizé maritime de l'Atlantique. Ils ont aussi montré qu'au delà d'une réponse annuelle immédiate de l'écoulement des cours d'eau à une saison des pluies déficitaire, une certaine durabilité du déficit hydrologique devrait être imputée à l'effet cumulé des longues années de sécheresse.

Des auteurs comme **Olivry *et al.* (1994), Mahé G., Olivry J.C. (1995), Paturel *et al.* (1995), Paturel *et al.* (1997), Servat *et al.* (1997)** distinguent la phase sèche actuelle des précédentes par sa **persistance**, son **extension** et son **intensité**. Cette phase sèche se fait ressentir dans les régions plus humides, situées en bordure du golfe de Guinée à partir de la décennie 1980, mais à un moindre degré.

Quelques travaux intégrant la décennie 1990, généralement peu documentée, indiquent une amélioration des conditions pluviométriques au cours de cette dernière (**L'Hôte *et al.* 2002 et 2003**). Mais, selon **Paturel *et al.* (2002), Ardoin *et al.* (2003)**, les niveaux des décennies 1950 et 1960 ne sont cependant pas encore atteints. La pluviométrie des années 1990 se situe au Sahel au niveau de celle des années 1970 (**L'Hôte *et al.* 2003**).

Des ruptures dans les séries pluviométriques sont détectées dans la plupart des unités climatiques et des bassins versants en Afrique de l'Ouest même si, en Afrique Equatoriale, cette tendance à la baisse des pluies depuis 20 ans ne s'accompagne pas toujours de ruptures (**Paturel *et al.* 2003, Laraque *et al.*, 2001, Mahé *et al.*, 2001**). Les déficits calculés de part et d'autre de ces ruptures sont généralement de l'ordre de 20%, mais peuvent parfois être supérieurs à 25% (**Servat *et al.* 1998**).

Pour ce qui est des analyses sur l'évolution des apports des cours d'eau de l'Afrique tropicale, le constat est général : la baisse prolongée des précipitations a eu des incidences parfois graves sur les

écoulements. Plusieurs auteurs **Olivry et al. (1993)**, **Mahé et Olivry (1999)**, **Servat et al. (1999)**, **Laraque et al. (2001)** présentent les mêmes bilans. Le phénomène est concomitant avec celui observé en pluviométrie.

L'analyse des basses eaux des fleuves tropicaux (**Pouyaud, 1986**, **Olivry, 1987**, **Olivry, 1996**, **Mahé et Olivry, 1999**, **Liéno et al. 1999**) montre de ce fait une faiblesse quasi générale des débits d'étiage, avec une tendance à la baisse régulière qu'accompagne une accélération du tarissement. Ce phénomène traduit un amenuisement des réserves souterraines des bassins fluviaux suite à une réduction de leur alimentation, conséquence d'une succession d'années de pluviométrie faible, souvent aggravée par des perturbations d'origine anthropique.

Selon **Mahé et al (2005)**, l'analyse du tarissement principal des fleuves et rivières a mis en évidence une augmentation importante du coefficient de tarissement. Pour **Olivry et al. (1998)**, dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, un effondrement des crues maximales est observé depuis 1970. Cette baisse de la puissance des crues s'accompagne d'une modification de l'hydrogramme des différents cours d'eau. Ces résultats confirment les conclusions faites par **Servat et al. (1998)** sur l'importance des déficits des débits moyens annuels qui sont rarement inférieurs à **30 %** et parfois supérieurs à **55%**, voire **60 %**. D'après **Olivry et al. (1993)**, cette baisse généralisée des variables caractéristiques des régimes hydrologiques est à l'origine des modifications de la forme des hydrogrammes annuels qui prennent des formes plus tronquées, en rapport avec la diminution des apports souterrains.

II.3 Sur l'utilisation des modèles hydrologiques

Ici, il est question d'analyser des études qui traitent de l'utilisation des modèles hydrologiques dans l'étude de la dynamique hydroclimatique d'un bassin versant en Afrique de l'Ouest.

Ouedraogo (2001) : « *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale* » utilise les modèles GR2M et Conway de la relation pluie-débit en procédant à la régionalisation des lames d'eau écoulées mensuelles et annuelles pour étudier l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest.

Ardoin S., Dezetter A., Servat E. (2002) : « *Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain* » testent quatre fonctions de productions en privilégiant la réserve en eau du sol et soulignent, à travers des bassins versants de la Côte d'Ivoire, l'intérêt des calages de bonne qualité effectués et des hydrogrammes correctement reconstitués.

Haziza E (2003) : « *Modélisation mensuelle pluie et débit/apport de la spatialisation-cas des données de sols* » montre l'importance de la modélisation conceptuelle dans le contexte de la variabilité

hydroclimatique. Il affirme que la distribution des données sol, au sein d'un modèle tel que GR2M, ne permet pas d'affiner les paramètres et n'améliore pas les performances du critère de qualité du modèle.

Ardoin S. (2004) : « *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne* » utilise des modèles pour analyser les régimes hydrologiques de grands bassins de l'Afrique. Elle encourage la transmission de ces outils de simulation de pluie et met en évidence leur sensibilité aux données d'entrée et aux paramètres choisis.

Kouassi A. M. (2007) dans « *Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire* » procède à une caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest avec le GR2M.

Vissin E. W. (2007) : « *Impact de la Variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger* » analyse la variabilité hydropluviométrique par la modélisation des écoulements des sous bassins béninois du fleuve Niger et l'impact de la dynamique des états de surface sur les écoulements de ces sous-bassins avec les modèles GR4J et GR2M.

Amoussou E. (2010) : « *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)* » met en évidence la relation climat/bilan de l'eau et confirme que le modèle GR2M reproduit bien le fonctionnement hydrologique et peut être adapté comme un outil de gestion des ressources en eau du bassin.

Tous ces auteurs ont bien analysé la péjoration climatique depuis les années 70 et son impact sur la variabilité hydroclimatique et donc sur les ressources en eau des bassins versants. Selon eux, l'utilisation d'un modèle pluie-débit s'avère un outil pertinent pour évaluer l'impact de cette péjoration climatique sur les ressources en eau des bassins.

Conclusion partielle

Le recensement est loin d'être exhaustif et beaucoup de travaux récents ne sont pas signalés. Les documents étudiés ont traité soit de thématiques concernant directement le bassin de la Falémé ou ses environs immédiats (climat, hydrologie, eau et gestion, géologie, géomorphologie...), soit de thématiques qui concernent le libellé de notre sujet d'étude (variabilité hydroclimatique, modélisation) et qui sont réalisés dans la zone de l'Afrique de l'Ouest. L'état de la recherche a ainsi concerné quatre principaux thèmes : (1) le climat ; (2) la variabilité hydroclimatique ; (3) les modèles hydrologiques pour caractériser la dynamique hydroclimatique ; (4) la gestion des ressources naturelles.

Ces contributions des auteurs, ô combien importantes à la connaissance du milieu et ses ressources, ont donné des informations sur plusieurs caractéristiques du bassin, en particulier sur la problématique de la gestion de ses ressources en eau.

De cette analyse, on peut citer plusieurs travaux, intéressants, qui sont davantage de plus en plus nombreux, surtout avec l'exploitation minière dans le bassin versant de la Falémé. L'analyse de ces documents nous ont permis également de tirer les conclusions suivantes :

- L'absence d'études de thèses strictement concentrées au bassin versant de la Falémé. Excepté les quelques mémoires qui portent sur ce bassin (Sèye F, Touré Bani, Fall E.A...), les thèses existantes ont étudié le bassin de la Falémé soit dans le bassin du fleuve Sénégal (par exemple Dione, et Labou), soit en rapport avec le fleuve Gambie (Sow A.A.). soit dans toute l'Afrique de l'Ouest (Ardoin...).
- L'absence d'une étude systémique « complète » : les documents analysés traitent souvent les thématiques énumérées de façon partielle ou sectorielle ; aucun d'eux n'a pu intégrer dans le bassin de la Falémé, à la fois, milieu, variabilité hydroclimatique, modélisation pluie et débit, et gestion intégrée des ressources en eau.

C'est en quelque sorte les différentes raisons (les absences notées) qui nous ont poussé à nous engager dans la présente étude portant sur l'hydrologie fluviale en domaine tropical et la gestion des eaux d'un bassin transfrontalier dans un contexte africain. Portant sur l'évaluation et la gestion de l'eau dans le bassin de la Falémé, elle s'est fixé comme objectif de faire un diagnostic du fonctionnement hydrologique du bassin, en vue de sa gestion, dans un contexte de déficit pluviométrique qui a sévèrement touché l'Afrique subsaharienne depuis plus de trois décennies.

De façon générale, la recherche documentaire a permis de faire une synthèse des travaux antérieurs dans le bassin de la Falémé, un domaine d'étude qui nécessite également la constitution de bases de données et le choix de méthodes adéquates.

Ce chapitre a pour objectif de présenter d'abord les données météorologiques et hydrologiques utilisées dans cette étude. Il définit également les sources et la qualité de ces données collectées sur le terrain et les techniques utilisées. Enfin, il expose aussi toutes les méthodes retenues pour l'analyse de la variabilité pluviométrique, de la dynamique hydrologique, la mise en relation pluie-débit dans le bassin de la Falémé et la gestion intégrée des eaux par bassin versant.

III.1 Les sources, la nature et la qualité des données

L'étude des fluctuations pluvio-hydrologiques de la Falémé nécessite des données climatologiques, hydrométriques, complétées avec des données quantitatives et qualitatives de terrain. La nécessité de disposer d'une longueur temporelle suffisante pour étudier l'évolution à long terme et les variations plus rapides nous a fait retenir une période d'étude de cinquante-huit ans (1951 à 2008).

III.1.1 Les données climatologiques : présentation, collecte et critique des données

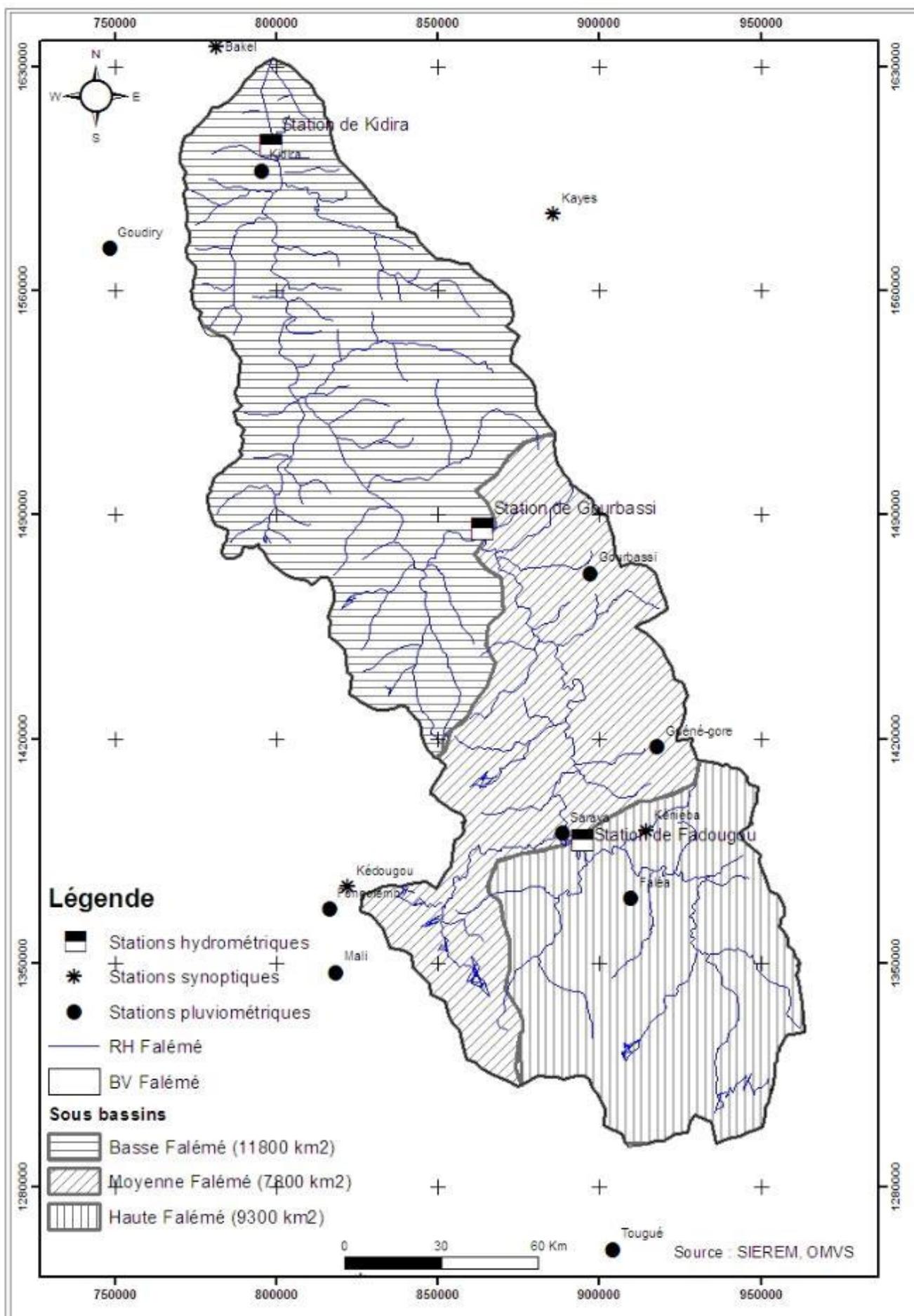
Les données climatologiques utilisées dans le cadre de cette étude sont en général recueillies par des organismes publics tels que l'Agence de la Météorologie Nationale ou l'ASECNA. D'autres structures telles que l'IRD, l'UCAD (Laboratoire d'Hydrologie), les organismes de bassins (OMVS et OMVG) ont été également visitées.

L'équipement pluviométrique du bassin versant de la Falémé est très faible avec cinq postes seulement : Kéniéba, Guene gore, Faléa, Gourbassi et Kidira avec de nombreuses lacunes. Au total, nous disposons de 11 postes pluviométriques, d'un poste agro-climatique et de quatre stations synoptiques, soit un total de 16 stations (Tableau 1). La plupart des postes pluviométriques furent installés en 1975.

Tableau 1: Caractéristiques des stations pluviométriques dans le bassin de la Falémé

Catégories	Stations concernées		
	Sous bassins Fadougou	Sous bassins Gourbassi	Total bassin Kidira
Pluviométriques	Mali, Tougué, Faléa, Saraya	Mali, Tougué, Faléa, Guéné-gore, Fongolimbi, Saraya, Gourbassi	Mali, Tougué, Faléa, Guéné-gore, Kéniéba, Fongolimbi, Saraya, Gourbassi, Goudiry, Kayes, Kidira
Agro-climatiques	-	-	Bakel
Synoptiques	Labé, Kéniéba	Labé, Kédougou, Kéniéba	Labé, Kéniéba, Kédougou, Tambacounda

En général, les mesures ont été effectuées avec soin. Néanmoins, elles ont fait l'objet de vérification et d'homogénéisation afin d'éliminer ou de corriger les relevés défectueux. L'actualisation des séries a été réalisée avec l'aide des services hydrologiques et météorologiques nationaux, les centres de recherche (IRD) et auprès de l'UCAD (la Carte 3 donne les différentes stations du bassin).



Carte 3 : Réseau pluviométrique et stations hydrométriques du bassin versant de la Falémé

La mise à jour des données des stations sénégalaises jusqu'en 2008 ainsi que la collecte des autres paramètres climatiques ont été effectués au niveau de l'ASECNA. La mise à jour des données des stations guinéennes et maliennes jusqu'en 2008 n'a pas été facile à cause de la non-appartenance de ces pays à l'ASECNA. Les stations guinéennes présentent quelquefois de nombreuses lacunes que nous ne parvenons pas à combler à cause des faibles coefficients de corrélations entre stations.

Le réseau des stations est assez dense dans la partie sénégalaise et malienne, contrairement à la partie guinéenne où le réseau est de faible densité (Carte 3). Mais, ce fait reste logique car les Etats sénégalais et malien représentent l'essentiel de la superficie du bassin de la Falémé.

Les nombreuses lacunes et la diversité des sources de collecte nous obligent à faire une critique statistique des données pour vérifier leur fiabilité.

III.1.2 Les données hydrométriques : présentation, collecte et critique des données

Le bassin de la Falémé a été équipé de trois stations hydrométriques où l'on mesure les hauteurs d'eau. Aucun des affluents, à savoir le Koila kabé, le Balinn ko, le Koulounko ko, le Dendji et le Sanankolé, n'est équipé de station ; toutes les trois se trouvant sur le cours principal. Il s'agit de la station de Fadougou au Mali, de la station de Gourbassi au Mali et de la station de Kidira qui contrôle tout le bassin.

Les stations de Fadougou et de Gourbassi se trouvant en territoire malien ne sont pas gérés par la DGPRE, contrairement à celle de Kidira qui est la seule du bassin qui se trouve en territoire sénégalais.

L'absence de stations sur les affluents et dans la partie guinéenne du bassin va constituer un obstacle à l'étude des manifestations de l'écoulement dans cette partie où, d'ailleurs, les précipitations sont plus abondantes. Il en sera de même pour une étude comparative des manifestations de l'écoulement dans les différents domaines climatiques du bassin. Les trois stations suivies dans le bassin sont :

- ✓ La station de Fadougou, qui se situe à $12^{\circ} 31' N$ et $11^{\circ} 23' O$, est la station la plus méridionale. Elle se localise dans le haut bassin et contrôle un sous bassin d'une superficie totale de $9\,300\text{ km}^2$, soit $32,17\%$ de la surface totale du bassin. Elle a été mise en service en 1956 et les données de cotes se situent entre l'intervalle de temps 1956 -2008. La station présente de nombreuses années lacunaires.
- ✓ La station de Gourbassi qui se situe au point $13^{\circ} 24' N$ et $11^{\circ} 38' O$ est mise en service en 1954. Elle contrôle le deuxième sous bassin qui se localise dans le bassin moyen avec une superficie totale de 7800 km^2 , soit $26,89\%$. La superficie du bassin entre Fadougou et Gourbassi est estimée à 17100 km^2 , soit $59,16\%$ de la superficie totale. Les données de cotes

disponibles se situent entre l'intervalle de temps 1954 et 2008. Les jaugeages effectués pendant cette période ont permis de tracer la courbe d'étalonnage.

- ✓ La station de Kidira qui se situe au point 14° 27' N et 12° 13' O est mise en service depuis 1930. Elle se localise dans le bassin inférieur dont la superficie totale de 11800 km², soit 40,8 %. Cette station contrôle l'ensemble du bassin avec une superficie totale estimée à 28900 km² entre Fadougou et Kidira.

L'exploitation des données de ces trois stations se fera avec Hydraces qui est un logiciel de traitement de données mis au point par l'I.R.D.

Les données de l'écoulement du bassin de la Falémé sont mesurées aux trois stations. Comme pour les données climatiques, les informations concernant ce bassin proviennent de sources diverses que constituent les réseaux hydrologiques nationaux sénégalais et maliens. L'étalonnage fait à partir des mesures de débits réalisées sur les stations a permis de constater s'il y a ou non des détarages (Figure 1).

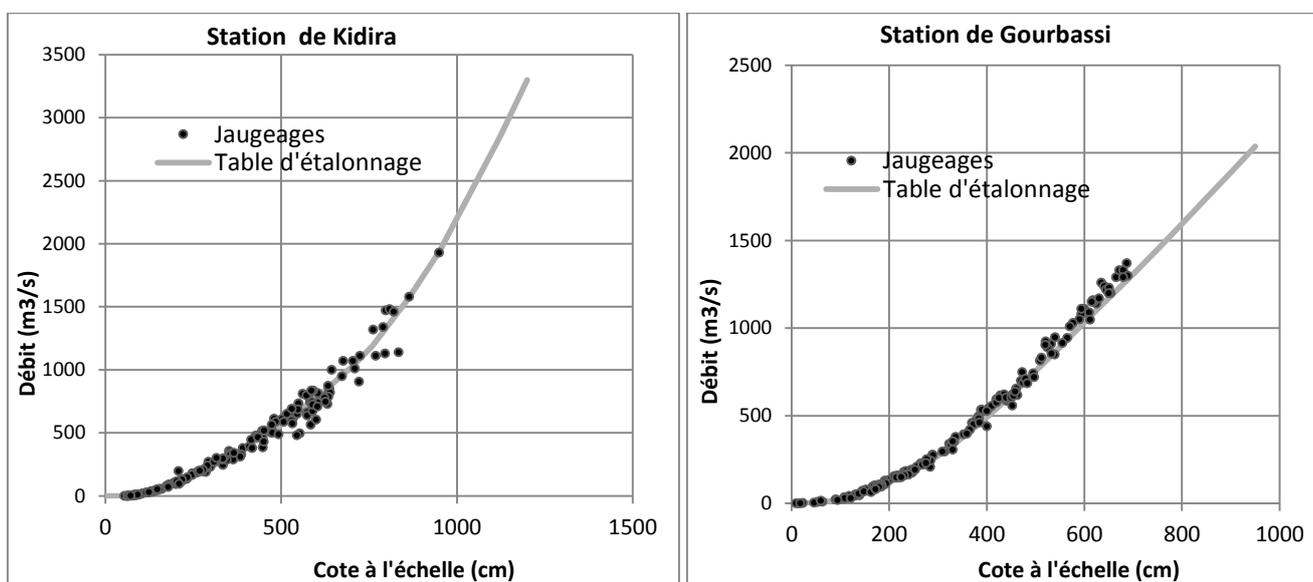


Figure 1 : Courbes d'étalonnage des stations de Kidira et de Gourbassi de 1950 à nos jours

III.1.3 Les données provenant d'observations et d'enquêtes de terrain

Le but de ces enquêtes est de compléter les informations quantitatives collectées et mesurées afin de mieux cerner les tâches dans lesquelles s'activent les populations pendant les saisons sèche et pluvieuse, l'utilisation qu'elles font de l'eau, les déterminants de la dynamique des états de surface et les stratégies de gestion de l'eau et des risques environnementaux.

Les principales sources ou personnes ressources consultées nous ont permis de collecter les informations nécessaires à une bonne lecture du fonctionnement des secteurs d'activités (agriculture, élevage, pêche, orpaillage, transports, exploitation forestière...) dans le bassin de la Falémé. Elles ont

permis, en particulier, de mieux comprendre les mécanismes et les pratiques des usagers et d'en mesurer les limites.

1. La délimitation des zones d'étude

Deux sites d'enquête ont été choisis : un au Nord du bassin de la Falémé (Kidira) et un autre au Sud (Saraya). Ce choix répond à l'objectif de la diversification de l'enquête dans le bassin de la Falémé. Le choix des villages a été effectué de manière raisonnée, en tenant compte de certains critères comme la proximité du cours d'eau et l'accessibilité. Le premier site d'enquête dénommé « zone Kidira (Boundou) » est localisé dans la basse Falémé et comprend des villages situés dans les communautés rurales de Ballou (Arrondissement de Modiry), de Bélé et de Sinthiou Fissa (Arrondissement de Bélé), de Gathiary et de Sadatou (Arrondissement de Kéniéba). Le deuxième site ou « zone Saraya » correspondant à la moyenne Falémé compte des villages dans les communautés rurales de Missira Sirimana (Arrondissement de Sabodala) et de Bembou (Arrondissement de Bembou).

2. La collecte des données

La collecte des données sur la situation socioéconomique des habitants vivant dans le bassin a été faite suivant la méthode d'échantillonnage aléatoire. Cette étape permettra de cibler par hasard les entités qui feront l'objet de l'administration des questionnaires standardisés au cours de l'étude sur la base d'une technique d'échantillonnage.

Tableau 2 : Echantillonnage (Source: Résultats d'enquêtes)

Zones	Nombre de villages interrogés	Nombre de ménages interrogés par village en moyenne	Nombre de ménages interrogés	Fréquence %	Nombre d'hommes interrogés	Nombre de femmes interrogées	Âge moyen
Kidira	18	9	147	50	280	14	
Saraya	18	9	147	50			
Total	36	-	294	100	294		48

L'échantillon est composé de 294 chefs d'exploitation répartis comme suit : 147 au Nord et 147 au Sud. Le nombre de ménages interrogés par village en moyenne est de 9. Le questionnaire a concerné 36 villages sur les 181 villages localisés dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé, soit 1/5,82 des villages (par exemple, sur 6 villages, un est choisi pour les enquêtes), ce qui correspond à un taux de sondage global de 19,9 %. Sur cela, 294 ménages sont interrogés sur 1179 pour l'ensemble des 36 villages riverains explorés ; ce qui correspond à un taux de sondage global de 24,9 %. La liste des villages ainsi que la proportion des ménages d'enquête figurent dans les annexes. Les villages interrogés dans la CR de Sadatou, bien qu'appartenant administrativement à la zone de Kidira, se rapprochent géographiquement de celle de Saraya de par la population et les activités socio-économiques pratiquées. Par rapport à la répartition des personnes interrogées par sexe, l'échantillon compte 14 femmes (soit 4,8%) contre 280 hommes (soit 95,2%). Cette situation s'explique par des considérations sociales qui interdisent souvent la parole aux femmes. L'âge des personnes interrogées

varie entre 40 et 80 ans, pour une moyenne générale se situant à 48 ans et un coefficient de variation de 0,13.

Le choix des villages repose sur l'accessibilité, la couverture en pistes carrossables et la nature de l'activité (les activités qui sont liées à l'eau sont préférentiellement choisies). Les enquêtes de terrain, fondées sur la MARP, comprennent des entretiens semi directifs individuels (informateurs clés) ou de groupe (réunions en assemblée en présence des habitants du village concerné avec la présence des différentes couches socioprofessionnelles) et des enquêtes menées à partir de questionnaires standardisés (données primaires quantitatives et qualitatives).

III.2 L'approche méthodologique

Les méthodes diagnostiques utilisées pour cette étude sont essentiellement statistiques. Elles ont permis d'analyser les variabilités physiographique, pluviométrique et hydrologique, mais également de détecter les relations qui les lient.

III.2.1 La méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP)

Afin de déterminer les affinités entre les différents sous-bassins étudiés et déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux, nous avons utilisé une Analyse en Composantes Principales pour chercher s'il existe d'autres descripteurs caractérisant cette relation. C'est une méthode de réduction du nombre de variables permettant la représentation géométrique des observations et des variables. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls (Bouroche et Saporta, 1980³⁴).

L'analyse en Composantes Principales ou ACP est une méthode statistique d'analyse des données. Elle permet, à partir d'une matrice à n échantillons (individus) et p variables, la description du nuage dans un espace à p dimensions.

Considérons un tableau de données à n échantillons ou unités statistiques (u.s) et p variables. Les échantillons représentent les lignes du tableau et les variables ses colonnes. Pour faciliter la visualisation de l'ensemble de données, chaque u.s est projetée dans un espace à n dimensions (espace des u.s) et chaque variable peut être projetée dans un espace à p dimensions (espace des variables) et n dimensions (espace des unités statistiques).

Ainsi on obtient un nuage de points qu'il est impossible de visualiser. Donc pour faciliter la visualisation, on projette le nuage dans un espace à deux dimensions, déterminé à partir des axes principaux ou factoriels du nuage. Cette projection permet de minimiser l'erreur de la représentation de nuage.

³⁴ Bourouche, J.M. & Saporta, G., 1980 : *L'analyse des données*. 4ème Ed., Coll. *Que sais-je?* Presse universitaires de France.

Pour conserver au maximum la forme du nuage, donc son inertie par rapport au centre de gravité, on travaille sur des variables centrées, l'ACP étant dite centrée. De plus, afin d'éliminer l'influence de la taille des variables (problème d'échelle) dépendant des unités choisies, on considère comme variable normalisée le rapport de chaque valeur à son écart type, on réalise ainsi une ACP centrée réduite. Les variables centrées réduites sont donc sans dimension, leurs moyennes sont égales à 0 et leurs variances égales à 1.

Une fois déterminés les axes factoriels, le nuage est projeté dans les différents plans des facteurs principaux soit dans l'espace des variables, soit dans l'espace des u.s. Dans l'espace des u.s, l'ACP permettra de regrouper selon des facteurs identiques les échantillons présentant des caractères d'origine ou d'évolution similaire. L'interprétation de l'ACP consiste ensuite à déterminer les facteurs responsables (composantes principales) de la structure observée.

Le premier axe factoriel (F1) de cette représentation est tel qu'il détermine le maximum d'inertie du nuage et donc de la variance, le deuxième axe (F2) perpendiculaire au premier exprime le maximum de variance restante, le 3ème axe, toujours perpendiculaire aux deux autres, est défini par le maximum d'inertie restante, etc.

III.2.2 L'analyse et la critique statistique des données hydroclimatiques

Il s'agissait de reconstituer les données hydropluviométriques manquantes et de réaliser l'interpolation spatiale des données des 18 stations pour l'obtention du champ de pluie du bassin de la Falémé.

La critique statistique des données pluviométriques intéresse l'homogénéisation des données pluviométriques et l'étude des matrices de corrélation entre les stations pour le comblement des lacunes. Dans le bassin versant de la Falémé, nous allons présenter deux modèles statistiques à partir desquels les données seront vérifiées.

III.2.2.1 L'homogénéisation des données

Les données pluviométriques souffrent souvent d'erreurs qui proviennent soit d'observations mal recueillies, soit de changement de site ou d'appareil de mesure sur le terrain. Les séries recueillies sont souvent de taille et de qualité inégale, donc difficiles à exploiter telles quelles, compte tenu des diverses sources d'erreurs allant des erreurs de manipulation aux erreurs d'oubli, de transcription (Brunet-Moret, 1969). Tous ces facteurs sont, en effet, susceptibles d'affecter la qualité des données recueillies.

L'homogénéisation des données s'effectue par la méthode des doubles masses ou doubles cumuls tirée de Brunet-Moret, Dubreuil et Roche. Pour faire une homogénéisation, il faut obligatoirement avoir deux stations (stations A et B) appartenant au même domaine climatique et utiliser la méthode des doubles cumuls ou «double masse ». Le principe consiste à vérifier à partir de la station de référence A, les données de la station B. Le cumul des données des stations A et B est porté sur un graphique avec en abscisse les données de la station de référence A et en ordonnée celle de la station à vérifier.

L'homogénéisation permet d'éviter les conclusions erronées, en comparant les totaux annuels cumulés de deux stations. Au-delà de l'appartenance des deux stations à la même zone climatique, le choix de la station de référence se fonde aussi sur la longueur de la série d'observations.

- Si les points s'alignent de façon linéaire le long de la droite, on en conclut que les données sont homogènes (**Figure 2**).
- Si les points se localisent tous d'un côté de la droite ou s'il y a des cassures dans la distribution des points, on peut dire que la série n'est pas homogène.

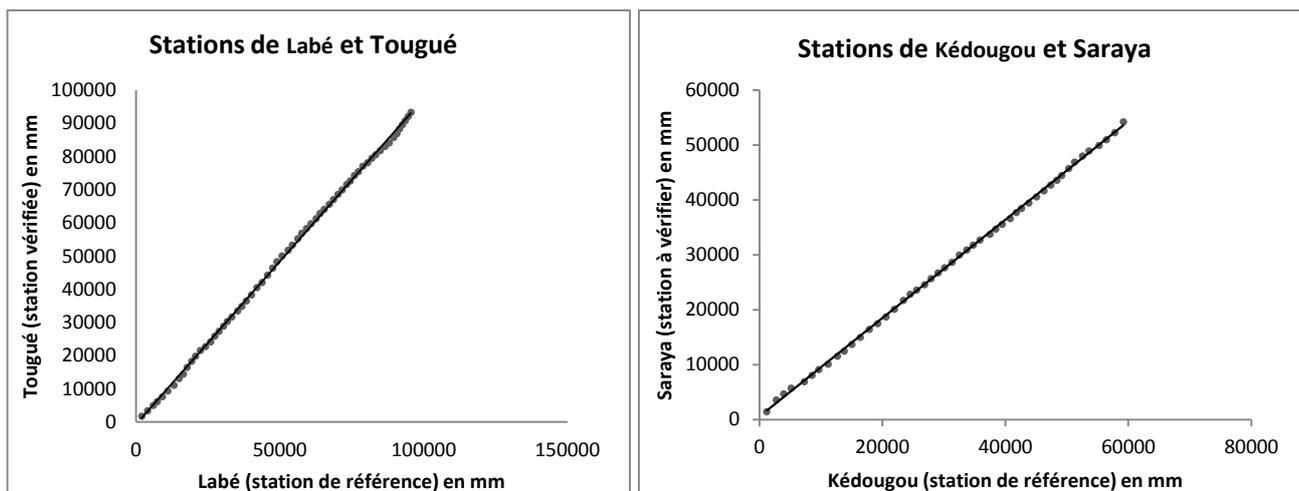


Figure 2 Exemple de double cumul entre stations pour l'homogénéisation des données pluviométriques

Pour corriger la série non homogène, il suffit de former le rapport des pentes de la tangente a et a' de la droite ainsi tracée. La valeur de ce rapport est le coefficient correctif par lequel il faut multiplier les valeurs considérées comme erronées en commençant par l'année où les cassures sont observées (**Figure 2**).

III.2.2.2 Le comblement des lacunes par la régression linéaire

Les lacunes des données pluviométriques connaissent une variabilité saisonnière qui est peu importante pour les mois qui coïncident avec la saison non pluvieuse et demeurent importantes aux mois qui constituent la saison pluvieuse : juin, juillet, août, septembre. Le comblement des lacunes procède d'une régression linéaire entre stations assez proches. L'équation est de la forme :

$$Y=AX+B$$

Où Y est la pluie recherchée pour un mois ou une année lacunaire à une station, A le coefficient de la régression, X la valeur de la précipitation pour le mois ou l'année correspondant à la station de référence et B la constante de l'ajustement.

L'équation associe un coefficient de corrélation R qui permet de mesurer le degré de liaison entre deux stations et qui est compris entre 0 et 1. De préférence, on choisit les stations qui donnent le coefficient le plus élevé.

$$Y = AX + B \pm \epsilon$$

Avec $\pm \epsilon$: Résidu positif ou négatif

Le vecteur régional se définit comme « une série chronologique d'indices pluviométriques, de l'issue de l'action la plus probable au sens de la plus fréquente, compte tenu des données d'un ensemble de stations d'observations groupées en région. « *Le vecteur régional est donc une suite chronologique d'indices annuels de précipitations prenant en compte les effets de persistance, de tendance de pseudo cycle de la zone climatique, mais homogène dans le temps* » (Brunet-Moret, 1977).

$$z_i = \sum_{a=1}^{a=n} (P_{ai}/P_a) / n$$

Où ZI est l'indice du vecteur régional, P_{ai} la pluie moyenne de l'année i à la station a , P_a la moyenne de la série des pluies annuelles à la station a et n le nombre de stations.

Le calcul des écarts à ZI pour chaque station a pour une année i selon la formule :

$$z_{ai} = \left(\frac{P_{ai}}{P_a} \right) - z_i$$

Cette formule permet de calculer les différentes erreurs possibles d'appareillage, de transcription et de réparer les valeurs aberrantes ou anormalement trop fortes ou basses et dont il faut rechercher les causes probables dans les archives pluviométriques.

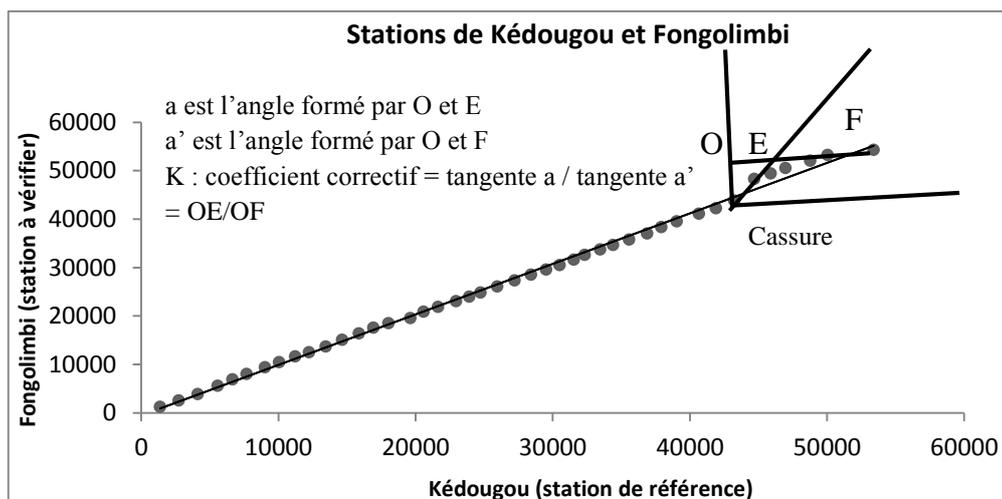


Figure 3 : Exemple de correction d'une cassure dans les séries pluviométriques par la méthode des doubles cumuls (Sow A.A 1984, 2007).

Cette méthode de vecteur régional est introduite dans le logiciel Hydracces que nous avons utilisé. Ce logiciel nous a fourni une suite chronologique d'indices annuels représentant la pluviométrie et une

moyenne interannuelle étendue pour chaque station analysée. Ces deux valeurs permettent de reconstituer les valeurs lacunaires.

Les stations non homogènes se corrigent en formant le rapport des pentes, déterminé par les tangentes a et a' . Le rapport donne le coefficient correctif (K) qui est multiplié par les totaux considérés comme faux en débutant par l'année à partir de laquelle les cassures sont observées dans la distribution des points (Figure 3).

$$K = \frac{\text{tangente } a}{\text{tangente } a'} = \frac{OE}{OF}$$

Avec K qui est coefficient correctif, a l'angle formé par O et E , a' l'angle formé par O et F , OE et OF étant des droites.

Tableau 3 : Coefficients de détermination *via* le double cumul entre stations pluviométriques

Domaines climatiques	Stations de base	Stations liées	Coefficient de détermination (R^2)
Nord soudanien	Tambacounda	Goudiry	0,999
		Kayes	0,997
		Bakel	0,997
	Bakel	Kidira	0,994
		Goudiry	0,996
Sud soudanien	Kédougou	Saraya	0,927
		Gourbassi	0,961
		Kéniéba	0,955
Guinéen	Labé	Tougué	0,999
		Mali	0,999

Par le biais du coefficient de corrélation, la formule nous a permis de caractériser les affinités pluviométriques entre les stations qui se trouvent dans un même domaine climatique (Tableau 3). La liaison pluviométrique n'est significative que lorsque le coefficient de corrélation est élevé. Les coefficients de corrélation que nous avons obtenus sont dans l'ensemble élevés, supérieurs à 0,9.

III.2.3 Les méthodes d'étude de la variabilité hydropluviométrique du bassin

Elles concernent l'analyse de l'évolution temporelle, les moyens de détection des modalités de variation, la mise en relation des différentes variations et l'établissement des bilans climatique et hydrologique.

L'application de ce test a été effectuée à l'aide du logiciel Khronostat développé par l'Institut Français de Recherche pour le Développement (IRD). Différentes approches ont été utilisées pour l'étude de la variabilité pluviométrique. Cette étude est fondée en premier lieu sur le calcul des moyennes mobiles sur cinq ans qui donnent des séries hydrométriques et pluviométriques lissées sur les différentes stations du bassin aux pas de temps mensuel ou annuel.

En outre, l'évolution sur le long terme est analysée par régression linéaire. La significativité statistique de la tendance est vérifiée par le test de Student. Une tendance en pourcentage a également été calculée sur chaque station du bassin. Ici, il s'agit du rapport entre le coefficient directeur de la droite de régression sur la pluviométrie moyenne de la station multipliée par le nombre d'années. Il a permis d'identifier les stations qui ont connu une importante baisse pluviométrique.

Le filtre non récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 permet de filtrer les variations saisonnières par le calcul des totaux pluviométriques pondérés. Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique, les moyennes mobiles ont été centrées, réduites, exprimées par l'équation suivante :

$$I = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_i}$$

Avec : x_i qui est la hauteur de pluie totale pour une station i et une année j ; \bar{x} la moyenne annuelle de pluie à la station i pendant la durée entière de l'enregistrement ; σ_i l'écart type de la série pluviométrique annuelle.

Ainsi, pour chacun des postes pluviométriques et hydrométriques retenus, un indice annuel de la variable pluviométrique (ou hydrométrique) a été déterminé.

L'existence de modifications brutales de certains paramètres statistiques des séries hydroclimatiques, en particulier de leur moyenne, est une cause possible de la rupture de l'homogénéité de ces séries. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable de Pettitt. La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k définie permet d'apprécier l'importance de la rupture.

L'absence de rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de l'année de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable.

La détermination des variations (déficits) hydropluviométriques permet de déterminer le pourcentage de variations de la moyenne de la série considérée (pluie, débit...) d'une sous période T_i autour de la période T considérée (Mahé et Olivry, 1995). Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, cette méthode précise le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture et s'obtient par la formule suivante :

$$D = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_i} - 1$$

Où : D est le déficit, \bar{x}_j la moyenne de la période après la rupture et \bar{x}_i la moyenne de la période avant la rupture.

Les tendances hydrologiques, l'homogénéité des séries hydrométriques, la vérification de la stationnarité des séries hydrologiques et la détermination du déficit d'écoulement sont aussi effectuées.

Les paramètres de la variabilité traduisent la succession d'excédents et de déficits en eau. Ainsi le climat devient sec quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle, et qu'il n'y a pas de réserve d'eau disponible.

III.2.4 Les méthodes d'évaluation des ressources en eau

Pour évaluer les ressources en eau dans le bassin de la Falémé, un certain nombre de paramètres s'imposent

III.2.4.1 Le calcul de la pluie moyenne du bassin

Plusieurs méthodes permettent, à partir des postes pluviométriques installés dans un bassin, de déterminer la pluie moyenne d'un bassin : la moyenne pondérée des surfaces, la méthode des isohyètes par planimétrie et la méthode de Thiessen.

Pour caractériser et calculer la lame d'eau moyenne dans le bassin de la Falémé et dans ses sous bassin (sous bassin de Fadougou, sous bassin de Gourbassi et bassin total de Kidira), nous avons choisi les stations synoptiques et pluviométriques que nous avons utilisées dans cette étude et pour chaque sous-bassin, nous n'avons choisi que les stations concernées (**Tableau 4**) pour caractériser la pluie moyenne.

Tableau 4: Synthèse par sous bassin par rapport aux stations concernées dans le bassin de la Falémé

Sous bassins		Synthèse du bassin		Stations concernées
Noms	Superficie	Noms	Superficie	
Fadougou	9300	Fadougou	9300	Mali, Labé, Tougué, Faléa, Saraya, Kéniéba
Gourbassi	7800	Fadougou + Gourbassi	17100	Mali, Labé, Tougué, Faléa, Kédougou, Guéné-gore, Kéniéba, Fongolimbi, Saraya, Gourbassi
Kidira	11800	Fadougou + Gourbassi + Kidira	28900	Mali, Labé, Tougué, Faléa, Kédougou, Guéné-gore, Kéniéba, Fongolimbi, Saraya, Gourbassi, Tambacounda, Goudiry, Kayes, Kidira, Bakel

Pour calculer cette lame d'eau moyenne, nous avons utilisé le logiciel qui a permis de calculer les valeurs moyennes de chaque sous-bassin. Les moyennes calculées sont : *Moyenne arithmétique*, *Thiessen*, *Inverse Distance* ou *Krigeage*. Cela étant, pour l'étude du bilan hydrologique avec la détermination du déficit d'écoulement (DEmm) et du coefficient d'écoulement (CE %), c'est la moyenne de Thiessen que nous avons utilisée.

III.2.4.2 La détermination de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est un des termes majeurs du bilan hydrologique en relation directe avec le climat caractéristique des zones tropicales semi-arides, faisant intervenir le climat, le sol ou encore la végétation.

Aucune interpolation spatiale n'a été réalisée pour estimer les valeurs de l'ETP du bassin. Pour cette variable, seules les données des stations de Kédougou et de Bakel étaient disponibles. Elles ont été considérées comme représentatives du bassin versant. En effet, la variabilité spatiale des températures

ou du rayonnement, qui sont des variables d'entrée du calcul de l'ETP, est beaucoup moins forte que celle des précipitations.

Parmi les différents types d'ETP pouvant être utilisés dans le modèle, le choix a été fait en fonction des données fournissant le meilleur calage. Celles-ci sont issues des formules de Penman-Monteith, calculées avec la feuille (GD BHídrico 4,0, 2003). Les deux paramètres (pluie et ETP) étant connus, l'étude de la variabilité hydropluviométrique devient possible.

III.2.5 La modélisation hydrologique de la relation pluie-débit

Aujourd'hui, la nécessité de quantifier les phénomènes de types extrêmes comme les crues exceptionnelles est un des domaines les plus connus du grand public, mais la connaissance des débits moins exceptionnels reste fondamentale dans le cadre de la gestion de la ressource en eau, en relation directe avec la demande en eau des populations.

Chaque point d'un cours d'eau permet de définir un bassin versant et les débits observés en ce point sont directement liés aux précipitations tombées sur ce bassin. A partir des observations faites en quantifiant la pluie tombée, on peut arriver à reproduire la réponse en débit du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme la transformation de la pluie en débit, passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique.

Le passage de la pluie au débit reste un problème complexe mais demande pour une utilisation simple un nombre de paramètres limité. La modélisation conceptuelle permet de limiter le nombre de paramètres entrant en jeu dans le modèle mais renonce à une connaissance minutieuse des différents phénomènes, l'objectif principal étant de reproduire au mieux le comportement global d'un bassin donné face à une série chronologique de données pluviométriques.

III.2.5.1 L'intérêt de l'application d'un modèle pluie-débit

Le modèle permet de répondre à des questions d'ordre opérationnel (outil d'application), allant de la prévision de crues et d'étiages à la prédétermination des crues, en passant par le dimensionnement d'ouvrages, la gestion de barrages et la détection d'impacts.

1. Le choix de l'élément à modéliser

La pluie est une des variables climatiques fondamentales à prendre en compte pour toute étude traitant de la gestion de la ressource en eau. A l'échelle du bassin versant, cette variable est logiquement considérée comme l'élément hydrologique clé à l'origine de la réponse du bassin en termes de débit. Dans le cadre des modèles de transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (appelés modèles pluie-débit), la donnée de précipitations est considérée comme l'entrée climatique principale. La variabilité temporelle de la pluie entraîne des variations de débit, ces variations étant d'autant plus délicates à modéliser qu'elles sont rapides (Ancil et al, 2006³⁵).

³⁵ Ancil, F., N. Lauzon, V. Andreassian, L. Oudin et C. Perrin (2006). "Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization." *Journal of Hydrology* 328(3-4): 717-725.

Ici, il est question de voir comment la variabilité de la pluie moyenne dans le bassin (aux sous bassin de Fadougou, Gourbassi et Kidira) influe sur les performances du modèle utilisé et donc sur la lame d'eau moyenne écoulee du bassin.

2. Le choix du modèle et de l'échelle

La modélisation conceptuelle est beaucoup utilisée ces dernières années dans le contexte de la modélisation hydrologique de bassins versants, sous l'emprise de la variabilité climatique et des actions anthropiques (Ouédraogo, 2001 ; Ardoin, 2004 ; Kouassi A. M., 2007 ; Vissin E. W., 2007 ; Amoussou E., 2010). Le choix de modèles repose tout d'abord sur la performance, la cohérence n'intervenant que si les performances des modèles en concurrence pour chaque pas de temps demeurent très proches (Mouelhi, 2003³⁶). Notre choix a porté d'abord sur le modèle de gestion des eaux pluviales «SWMM³⁷». Par manque de certaines données d'entrée dudit modèle et compte tenu des données disponibles sur la zone d'étude, notre choix a porté ensuite sur des modèles globaux moins exigeants en données. Ces modèles ont l'avantage d'être peu consommateurs de données (pluie, évapotranspiration et débit pour le calage) enregistrées par nos réseaux climatologiques.

Enfin, il a été question de déterminer l'échelle de l'étude. A l'échelle de dizaine à centaine de milliers de km², les données journalières s'avèrent trop lourdes et les données annuelles ne permettent pas de mettre en évidence les variations telles que les saisons de pluies. Le pas de temps mensuel semble donc être le plus approprié à ce type de climat. Dans ce cadre, l'absence de fonction de transfert permet de s'intéresser uniquement à la fonction de production. Ainsi les variables de pluies, débits et ETP, ne sont connues que par leur sommation sur un mois calendaire ; la répartition de celles-ci à l'intérieur de chaque mois n'est pas prise en compte. Ainsi au pas de temps mensuel, le choix a été porté sur le modèle GR2M pour sa performance et sa robustesse (Ouédraogo, 2001 ; Mouelhi, 2003 ; Ardoin, 2004 ; Kouassi A. M., 2007 ; Vissin E. W., 2007 ; Amoussou E., 2010).

III.2.5.2 La présentation et le fonctionnement du modèle GR2M

Le modèle mensuel GR2M a été sélectionné pour servir de base à ce travail. Ce modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'application dans le domaine des ressources en eau.

1. La description du modèle

Le modèle mensuel GR2M est un modèle global, fonctionnant au pas de temps mensuel. Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions

³⁶ Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

³⁷ SWMM est un modèle semi-distribué qui a un environnement structuré en 6 composantes dont certaines ont près de 15 paramètres d'entrée. Ainsi, nous n'avons pas pu obtenir, malgré de longues et pénibles recherches, une bonne partie des données requises.

antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique (de Mouelhi *et al.* 2006b³⁸). Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

Le modèle GR2M, par ses qualités de robustesse, de simplicité et d'efficacité, est adapté à l'approche envisagée. La structure de GR2M est la suivante :

- ❖ une fonction de production faisant intervenir : (1) une fonction de neutralisation entre la pluie et l'ETP ; (2) une fonction de rendement dépendant d'un réservoir de suivi d'humidité (qui se vide par évaporation et se vidange aussi, de façon secondaire par percolation) ; (3) une fonction d'échange en eau permettant de simuler des échanges avec l'extérieur du bassin ;
- ❖ une fonction de transfert présentant deux composantes d'écoulement : (1) l'une faisant intervenir un hydrogramme unitaire, avec une phase de montée, assure le transfert de 90% de la pluie efficace, qui est ensuite routée par un réservoir non linéaire ; (2) l'autre faisant intervenir un hydrogramme unitaire avec une phase de montée et une phase de descente, assure le transfert des 10% restants de la pluie efficace.

Les deux paramètres ajustables du modèle sont **X1** : la capacité maximale du réservoir de production et **X2** : le coefficient d'échanges souterrains.

2. Les données demandées

L'utilisation de ce modèle GR2M dans un bassin donné nécessite les informations suivantes pour les calculs : la superficie du bassin en kilomètres carrés, les chroniques mensuelles de pluie (P) sur le bassin (moyenne spatiale en millimètres), les chroniques mensuelles d'évapotranspiration potentielle (E en millimètres) et les valeurs initiales des taux de remplissage du réservoir de production ($X1$). La principale donnée de sortie du modèle est l'écoulement à l'exutoire (Q).

3. La hiérarchisation des différentes étapes

Un schéma de la structure est donné à la **Figure 4**. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

- La production :

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol, très similaire à celui existant dans le modèle GR4J. Du fait de la pluie P , le niveau S dans le réservoir devient S_1 défini par l'équation n° 1.

³⁸ Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andreassian, V. (2006b) Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *J. Hydrol.* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie P_1 en excès est donnée par l'équation n° 2.

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau S_1 devient S_2 défini par l'équation n° 3.

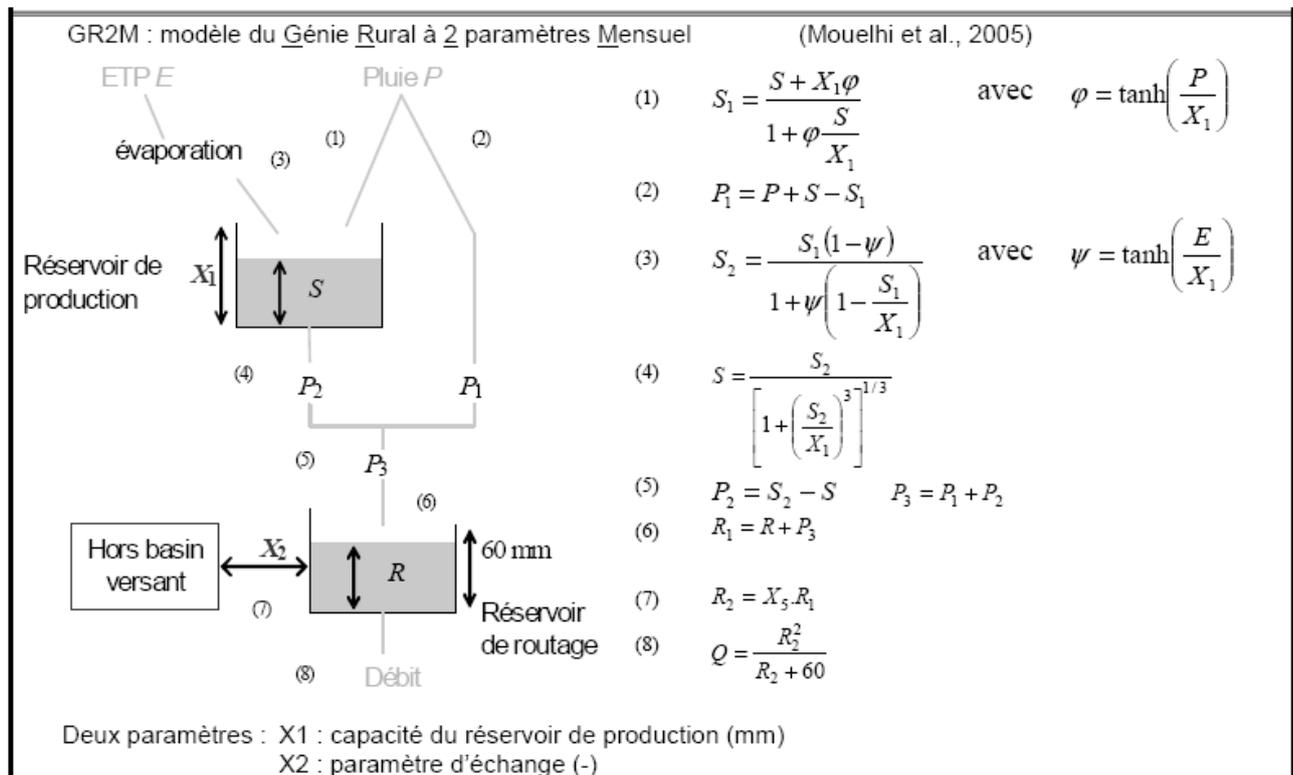


Figure 4 : Architecture du Modèle GR2M (Source : Mouelhi, 2003)

- **La percolation :**

E est l'évapotranspiration potentielle. Le réservoir se vidange ensuite en une percolation P_2 et son niveau S , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par l'équation n° 4

- **Le routage et l'échange avec l'extérieur non atmosphérique :**

La pluie totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par l'équation n° 5.

Le niveau R dans le réservoir devient alors R_1 défini l'équation n° 6:

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient l'équation n° 7.

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange suivant une fonction quadratique. Le débit est donné par l'équation n° 8.

III.2.5.3 Les variables du modèle GR2M

Le modèle est une représentation d'un phénomène physique, afin d'en avoir une meilleure compréhension ou d'analyser l'influence qu'il exerce. On distingue plusieurs variables entrant en jeu dans le système :

- ✓ Les variables indépendantes correspondent aux données d'entrée du système. Ici, il s'agit des pluies mesurées P. Ces données fluctuent en fonction du pas de temps utilisé, donc dans notre cas, la pluviométrie va varier à l'échelle du mois.
- ✓ Les variables indépendantes ou variables de sortie : il s'agit essentiellement des débits simulés par le modèle à l'exutoire du bassin versant.
- ✓ Les variables d'état permettent de caractériser l'état du système modélisé, comme par exemple le niveau de remplissage des différents réservoirs d'eau du bassin.

III.2.5.4 La mise en œuvre du modèle GR2M

Il semble essentiel de distinguer, parmi les séries de données disponibles pour chaque bassin versant, deux périodes distinctes, d'égale importance : la première servant au calage, la deuxième à son contrôle (validation). Le choix a été fait de distinguer, dans la série pluviométrique disponible, la période "humide", débutant généralement dans les années 50, période à partir de laquelle on considère que les données recueillies sont fiables et se terminant à la période charnière de transition où l'on considère qu'il y a eu rupture climatique avec établissement d'un nouveau régime climatique, fixé à 1969. La deuxième période débute à la fin de la première et se termine aux alentours de 95, dates où les dernières données ont été recueillies. Elle est dite la période " sèche ".

III.2.5.4.1 Le calage-contrôle et la validation

La première étape dans la modélisation pluie-débit consiste à caler le modèle c'est-à-dire à extraire à partir des données d'entrée (pluie, ETP mensuelles) et de sortie (débits mesurés) les informations nécessaires pour déterminer les paramètres du modèle reproduisant au mieux les débits observés à l'exutoire d'un bassin versant donné. Cette étape permet de rapprocher le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, c'est-à-dire reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin. En général, la méthode de rapprochement de ces comportements consiste en l'optimisation des paramètres du modèle. Cette optimisation des paramètres du modèle s'est faite par le solveur d'Excel.

Une fois le calage réalisé, on procède au contrôle qui consiste à tester le jeu de paramètres obtenus sur les données différentes de celles ayant servi au calage (même station mais avec des périodes différentes). Durant cette étape, le jeu de paramètres obtenus lors du calage n'est pas modifié. Il est alors utilisé pour simuler les débits à partir des entrées du modèle. C'est en contrôle qu'il est significatif d'apprécier les performances du modèle (calcul des critères de performances). Le contrôle permet de détecter la présence d'éventuelles erreurs résiduelles et la vérification de l'architecture et de la structure du modèle. La validation consiste à appliquer le modèle ainsi calé et contrôlé sur des périodes autres que celles ayant servi au calage.

III.2.5.4.2 L'évaluation de la performance du modèle

Le modèle hydrologique GR2M permet de produire une série chronologique de débits Q_c à partir des entrées de pluie (P) et d'évapotranspiration potentielle (E). La modélisation sera d'autant plus satisfaisante que les débits Q_c seront proches des débits Q_o effectivement observés.

Apprécier la validité du modèle consiste à juger de la proximité des deux séries chronologiques Q_o et Q_c (Makhlouf, 1994). Selon Hamby (1994)³⁹, cette analyse est utile non seulement pour le développement des modèles mais aussi pour leur validation et la réduction des incertitudes.

Afin d'évaluer l'exactitude du modèle, les résultats sont comparés à des hydrogrammes pris à partir des données de terrain. Les données prises sur les sites de Fadougou (haut bassin), Gourbassi (bassin moyen) et Kidira (bassin inférieur) se sont avérées très précieuses, car les sites sont situés là où le débit montre une différence entre les trois sous bassins (haute, moyenne et basse) de la Falémé.

1. L'indice de Nash-Sutcliffe

Pour exprimer la corrélation entre les valeurs observées et les valeurs simulées, nous exprimons le critère de Nash dont nous présentons l'écriture :

$$Nash(Q) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{obs})^2} \right]$$

Où : Q_{sim} est le débit simulé ; Q_{obs} le débit observé ; n le nombre de pas de temps et \bar{Q}_{obs} la moyenne des débits observés de la série.

Il s'agit d'une concordance des hydrogrammes compris entre 1 et 100%, une valeur unité correspond à une corrélation parfaite entre les valeurs observées et celles simulées.

Il peut être interprété comme étant la proportion de la variance du débit observé, expliqué par le modèle. Si $T = 100\%$, l'ajustement est parfait, en revanche si $T < 0$, le débit calculé par le modèle est une plus mauvaise estimation que le simple débit moyen (Dechemi N. *et al*, 2003⁴⁰).

2. La racine carrée de l'indice de Nash-Sutcliffe

Ce sont les racines carrées des débits. Ce critère est plus sensible aux moyennes des débits. Il a pour formule :

$$Nash(\sqrt{Q}) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Q_{sim} - Q_{obs})^2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Q_{sim} - \bar{Q}_{obs})^2}} \right]$$

3. Le logarithme népérien de l'indice de Nash-Sutcliffe

Le logarithme népérien des débits est plus sensible aux périodes d'étiages. Il a pour formule :

³⁹ Hamby, 1994: A review of techniques parameters sensitivity analysis of environmental models, Environmental Monitoring and Assessment 32. 135-154

⁴⁰ N. Dechemi, T. Benkaci et A. Issolah (2003) « Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous » Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 16, n° 4, p. 407-424.

$$Nash (lnQ) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(Qsim - Qobs)^2}{\sum_{i=1}^n \ln(Qsim - \bar{Q}obs)^2} \right]$$

L'utilisation combinée de ces trois critères permet de mettre l'accent sur plusieurs situations hydrologiques. La performance du modèle peut être jugée selon les valeurs prises par le critère de Nash (Kachroo, 1986 cité par Kouassi A. M., 2007) : (1) Nash > 90% : le modèle est excellent ; (2) 80% < Nash < 90% : le modèle est très satisfaisant ; (3) 60% < Nash < 80% : le modèle est satisfaisant ; (4) Nash < 60% : le modèle est mauvais.

4. Le critère du bilan volumique

Le critère du bilan volumique permet de comparer les volumes simulés par le modèle aux volumes mesurés. L'objectif est de regarder si pour un critère de Nash équivalent, un jeu de paramètres différents de l'optimum obtenu par calage permet de mieux reproduire les volumes écoulés, tant en période de crues qu'en période d'étiages. Ce critère permet donc d'apprécier la proximité des hydrogrammes observés et calculés. Le modèle GR2M semble donc surestimer les écoulements lorsque : $L_o^1 < L_m^1$, tandis que lorsque $L_o^1 > L_m^1$, alors le modèle GR2M semble sous-estimer les écoulements.

5. L'évaluation des incertitudes associées aux valeurs de débits simulés

Les résultats sont et resteront toujours empreints d'une marge d'incertitude. Cette marge a un rôle essentiel dans la communication de résultats scientifiques. Pour certains, cette valeur qui borne le résultat a autant d'importance que le résultat lui-même.

Les erreurs sont traditionnellement représentées comme des différences entre débit observé et débit simulé, comme dans le critère de Nash. Mais, cette représentation n'est plus acceptable pour une utilisation pratique, car une même erreur absolue peut être mineure pour une pointe de crue et excessive pour un étiage (Berthier, 2005). Il est donc plus approprié de calculer les erreurs en faisant le rapport débit observé et débit simulé (Berthier, 2005). L'expression de l'incertitude associée au débit calculé par un modèle hydrologique est donnée par l'équation :

$$I = \frac{Q_{observé}}{Q_{simulé}}$$

Avec : *I* qui est l'incertitude associée au débit simulé, *Q_{observé}* le débit observé et *Q_{simulé}* le débit simulé.

Lorsque le modèle répond à ce critère, on estime qu'il constitue un outil satisfaisant pour représenter la dynamique du bassin versant dans l'hypothèse d'une stationnarité du comportement de ce dernier (absence de changement climatique à long terme).

Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash est proche de 100%. On peut affirmer qu'un

critère de moins de 60% ne donne pas une concordance satisfaisante entre les hydrogrammes observés et simulés par le modèle. Le Nash n'est pas limité inférieurement (Berthier, 2005). Ce critère adimensionnel permet de juger de la qualité de l'ajustement et de faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements ont des ordres de grandeur différents.

L'analyse des résultats de simulation est portée sur les performances des modèles au calage et à la validation. En effet, les performances au calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation (Perrin, 2000).

III.2.6 Les méthodes d'étude d'un cycle de gestion intégrée de l'eau par bassin versant

Un modèle universel de gestion intégrée n'existe pas, compte tenu de la complexité du système de gestion des ressources en eau qui se doit de prendre en compte les spécificités législatives, socio-économiques et culturelles. La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est un ensemble d'outils politique, social, économique et administratif mis en place pour gérer les ressources en eau tout en fournissant les différents services liés à son utilisation (Global Water Partnership, 2004⁴¹). Son application, confrontée à des concurrences de territoires, fait émerger « *un territoire de gestion et un territoire de décision, témoignant de la multiplicité des dynamiques sociales* » (Ghiotti, 2007⁴²). Dans un bassin versant, la gestion intégrée de l'eau est un processus qui favorise la gestion coordonnée de l'eau et des ressources connexes à l'intérieur de ses limites en vue d'optimiser, de manière équitable, le bien-être socio-économique qui en résulte, sans pour autant compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux (MENV, 2004)⁴³. L'élaboration d'un Plan Directeur de l'Eau (PDE) doit être fondée sur le cycle de gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

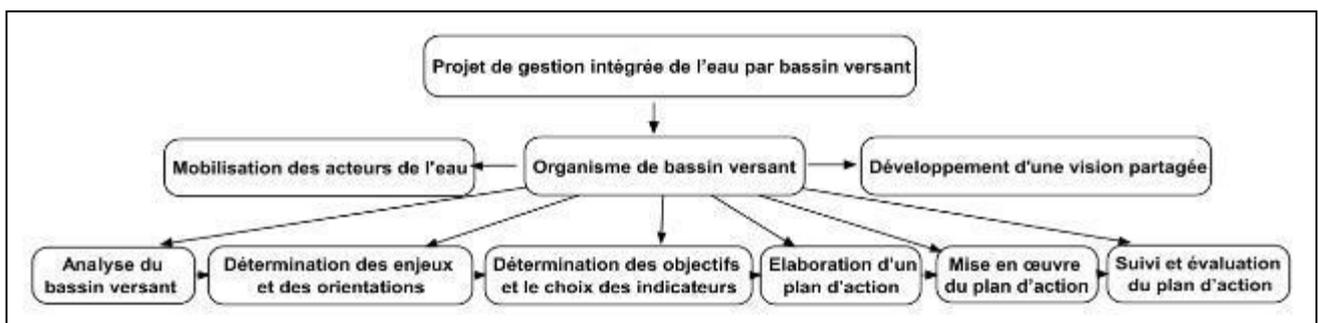


Figure 5 : Schéma du cycle de gestion intégrée de l'eau par bassin versant (Source : MENV, 2004 adaptée)

Les buts de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant sont les suivants : maintenir ou récupérer les usages de l'eau ; conserver ou restaurer l'intégrité physique, chimique et biologique des écosystèmes aquatiques ; protéger la santé humaine ; assurer un climat socio-économique durable. La gestion intégrée de l'eau par bassin versant peut concerner toutes les problématiques que l'on peut trouver dans un bassin versant. Plusieurs étapes doivent être franchies pour planifier adéquatement un projet

⁴¹ Global Water Partnership, 2004, *Catalyzing Change : a handbook for developing integrated water resources management (IWRM) and water efficiency strategies*. Stockholm, Elanders, 52 p.

⁴² Ghiotti S., 2007, *Les territoires de l'eau. Gestion et développement en France*. CNRS Editions, Paris, Espaces et Milieux, 246 p.

⁴³ MENV, 2004: *La gestion intégrée de l'eau par bassin versant : concepts et application*, Environnement, Québec, Environoq ENV/2004/0062, Direction des politiques de l'eau, Ministère de l'Environnement, 58 p, téléchargeable sur www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/concepts.pdf

de gestion intégrée de l'eau par bassin versant. Il s'agit de six étapes présentées à la **Figure 5**: (1) Analyse du bassin versant (portait et diagnostic) ; (2) Détermination des enjeux et des orientations ; (3) Détermination des objectifs et choix des indicateurs ; (4) Élaboration d'un plan d'action ; (5) Mise en œuvre du plan d'action ; (5) Suivi et évaluation du plan d'action.

Dans le déroulement normal d'un cycle de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV), sur les six étapes prévues, les quatre premières du cycle donnent lieu à un rapport, lequel est appelé, dans le contexte québécois, Plan Directeur de l'Eau (PDE). La présentation d'un projet de planification d'une gestion intégrée des ressources en eau par bassin versant nécessite, au préalable, la présentation de l'organisme du bassin, l'identification des acteurs de l'eau et le développement d'une vision partagée (**Figure 5**).

L'élaboration de chaque génération de PDE (y compris sa mise en œuvre, son suivi et l'évaluation du plan d'action) est un processus qui dure six à huit ans, selon divers organismes de bassins versants. Appliqué dans un bassin, le PDE permet d'assurer pertinemment une GIEBV. Un PDE du bassin de la Falémé est formulé et présenté.

Conclusion partielle

Il convient de retenir, au terme de ce chapitre, que d'assez nombreuses études ont été réalisées sur des axes de la thématique de cette thèse. Les résultats de ces recherches sont appréciables. Mais, nous tenterons ici d'utiliser quelques nouvelles méthodes d'investigation mieux adaptées aux complexités de notre terrain d'étude. Toutefois, l'emploi de ces nouveaux outils nous a amené à appliquer des tests pour vérifier l'efficacité de leurs résultats.

Malgré ces différents tests de vérification de l'efficacité des résultats, plusieurs obstacles subsistent comme l'insuffisance du réseau des stations pluviométriques qui ont servi à la régionalisation des données pluviométriques et la méthode d'estimation très approximative de l'évaporation.

En dépit de ces incertitudes, la constitution d'une base de données météorologiques et hydrométriques à différentes échelles de temps sur une longue période (1950-2008), celle d'une mini-base de données cartographiques sur chacun des sous bassins de la Falémé, constitue une avancée sensible, permettant le cas échéant d'autres études sur le domaine et, dans l'immédiat, d'analyser le comportement hydroclimatique du bassin de la Falémé.

Les différentes méthodes utilisées nous permettent de défendre la thèse suivante : « *Dans un contexte de variabilité hydroclimatique où la maîtrise des déficits en eau demeure un enjeu majeur, l'évaluation et la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin de la Falémé, sont indispensables, tant pour améliorer son environnement naturel que pour assurer le bon fonctionnement des activités liées à l'eau* ».

PARTIE 2 :

LA FALEME ET SON BASSIN

La deuxième partie de la thèse est subdivisée en trois chapitres. :

CHAPITRE IV : LE MILIEU ET LES FACTEURS STABLES DE L'ÉCOULEMENT

CHAPITRE V : LE CLIMAT DU BASSIN ET SA VARIABILITE

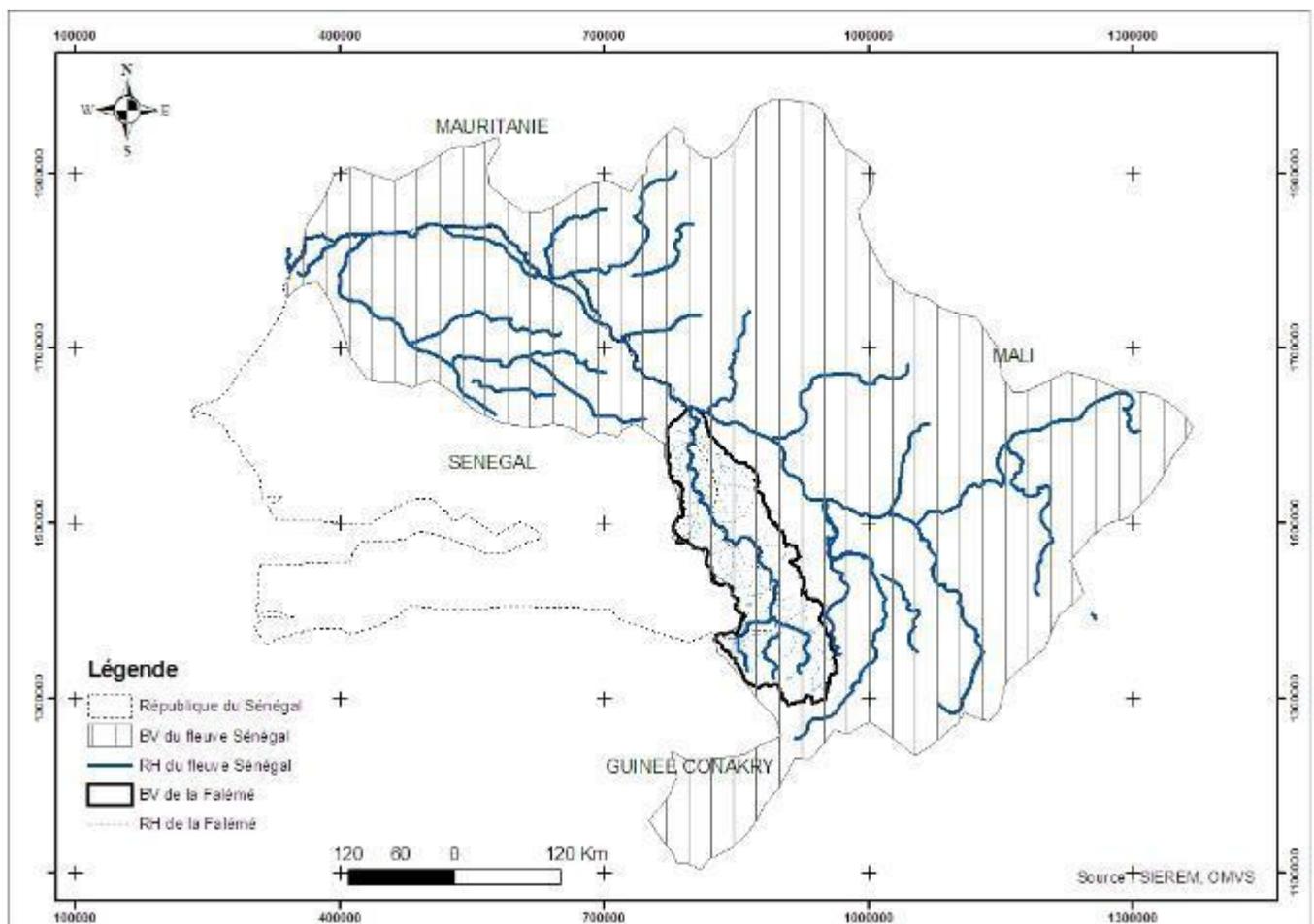
CHAPITRE VI : L'INFLUENCE DES FACTEURS SUR L'ÉCOULEMENT

Les modalités de l'écoulement fluvial sont le résultat d'interactions de facteurs divers, et c'est le bassin fluvial qui offre le meilleur cadre pour « une meilleure compréhension de l'interaction des facteurs morphologiques, litho-pédologiques, climatiques et biogéographiques » (Frécaut, 1983).

Cette partie présente la géologie, la géomorphologie et l'hydrogéologie, le sol et la végétation qui sont les paramètres stables du bassin.

IV.1 Le réseau hydrographique

La Falémé prend sa source à une altitude de 800 m dans la partie Nord du massif du Fouta Djallon, en République de Guinée. Affluent le plus important du fleuve Sénégal, le bassin de la Falémé couvre un espace géographique localisé entre les latitudes 12°11' et 14°27' N et les longitudes 11°12' et 12°15' O et une superficie de 28900 km². Le bassin de la Falémé (Carte 4) est à cheval entre trois Républiques : la République du Mali (pour 13800 km², soit 47,8), la République du Sénégal (pour 11500 km², soit 39,7%) et enfin la République de Guinée (pour 3600 km², soit 12,5%).



Carte 4 : Situation géographique du sous-bassin de la Falémé dans le bassin versant du fleuve Sénégal

La partie sénégalaise du bassin est centrée sur deux régions administratives avec le nouveau découpage et l'érection de Kédougou en région :

- La région de Tambacounda avec les départements de Bakel et de Goudiry et plus particulièrement dans l'arrondissement de Bellé (ex Kidira) et de Kéniéba,

- La nouvelle région de Kédougou, notamment le département de Saraya.

A la confluence des deux bras mères, le Koila Kabé et le Balinn Ko (Carte 5), la Falémé s'allonge sur 625 km de long jusqu'à la confluence avec le fleuve Sénégal.

Le tracé irrégulier est entrecoupé de petits rapides, le cours est sinueux, mais sensiblement Sud-Nord jusqu'à Fadougou (Carte 5). Elle a reçu, avant Fadougou, le Daléma, et à partir de Fadougou, elle reçoit le Dendji, un affluent à écoulement temporaire.

De Fadougou à Gourbassi, le cours de la rivière est orienté vers le NNO et à Gourbassi, il s'incurve vers la gauche selon une orientation Nord-est-Sud-ouest. C'est alors que la Falémé reçoit le Digie, puis le Digain Kiti sur sa gauche. Elle reprend alors la direction Sud-est-Nord-ouest.

Entre Gourbassi et Kidira (à la confluence), la Falémé reçoit à gauche le Gandamaka et le Dendji et à droite le Kabakoye et le Sanankolé, dernier affluent de rive droite.

De nombreux écoulements temporaires de moindre importance descendent du rebord du plateau Mandingue occidental pour grossir le bras principal. De son cours supérieur, la Falémé doit descendre de 600 m sur 70 km d'où une forte pente de 8,57 % qui diminue jusqu'à 0,015 % près de la confluence. La Falémé détermine avec ses affluents un bassin versant de 28900 km² où l'écoulement est souvent à sec pendant une partie de l'année.

L'essentiel des affluents de la Falémé est de rive gauche. Du Nord au Sud, on rencontre : le Dendji, le Gandamaka, le Digain kiti, le Digie, le Daléma, le Koila kabé. Le Sanankolé est le seul affluent important de rive droite.

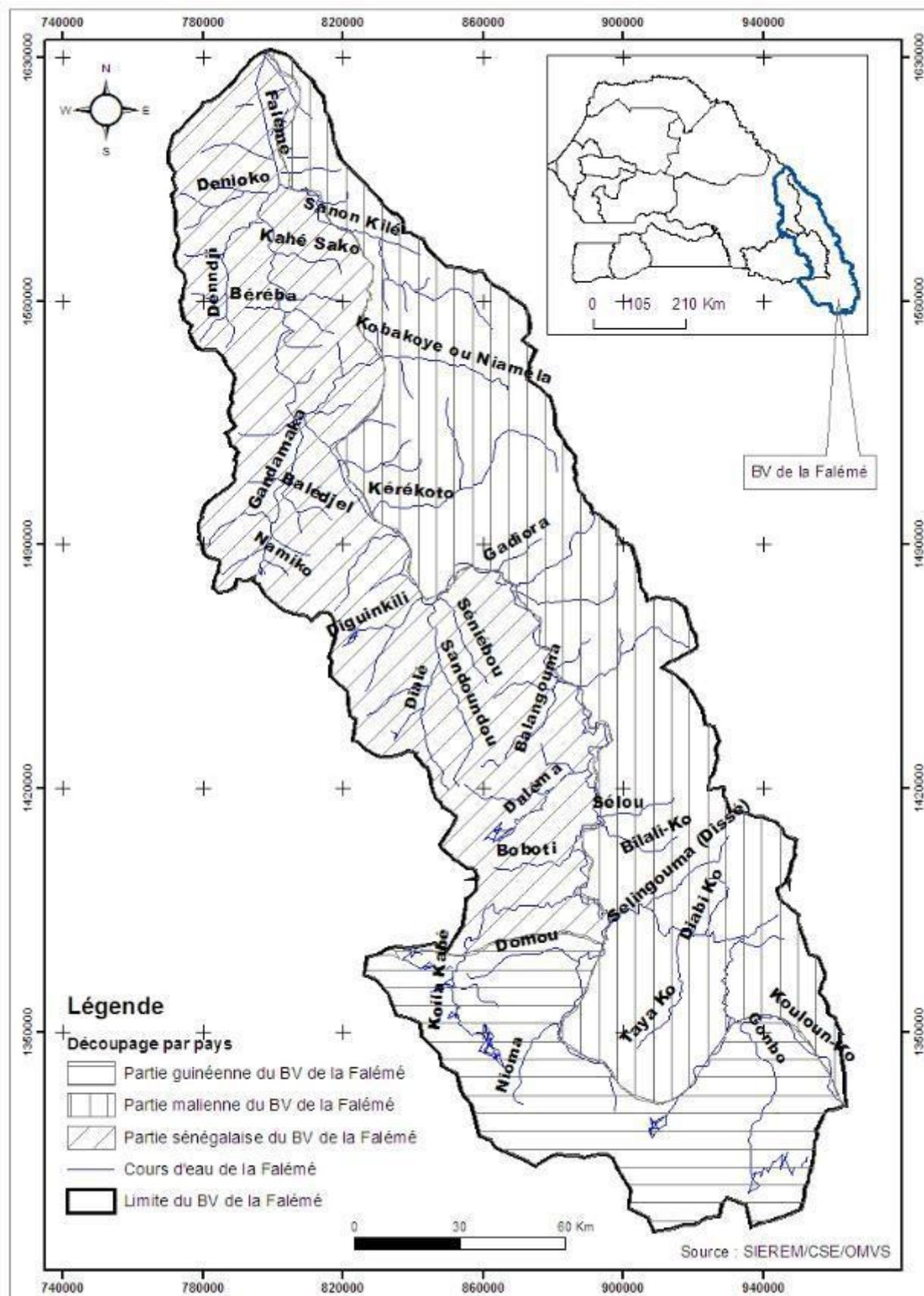
Dans le cours supérieur de la Falémé, les affluents s'enchevêtrent avec ceux de la Gambie et cessent de couler avant la fin de la saison pluvieuse.

Dans l'ensemble du bassin, le relief est uniforme avec des altitudes faibles. Seulement les contrastes d'altitudes sont assez importants entre les trois régions naturelles du bassin qui sont nettement différentes du Nord (la confluence) au Sud (la source). Ces trois régions naturelles qui se suivent sont : la basse Falémé, la moyenne Falémé et la haute Falémé, d'où les trois sous-bassins (Tableau 5).

Tableau 5 : Présentation des sous-bassins de la Falémé et de leur contribution (Source Sow A.A., 2007)

Stations	Superficie du bassin en km ²	Superficie des sous-bassins en km ²	Débits moyen en m ³ /s	Apports des sous-bassins et des affluents en m ³ /s	Apports des sous-bassins et des affluents en mm
Fadougou	9300		61,4	61,4	208
Gourbassi	17100	7800	73,5	12,1	49
Kidira	28900	11800	104	30,5	82
Synthèse du bassin	Superficie du bassin en km ²	Superficie du sous bassin en km ²	Augmentation du débit en m ³ /s	Total apports des sous bassins en m ³ /s	Total apports des sous-bassins et des affluents en mm
De Fadougou à Kidira	28900	19600	43	43	69

Le réseau hydrographique est plus hiérarchisé et plus dense dans la partie Sud et sur la rive gauche située en altitude. Il devient plus faible dans la partie Nord située dans des formations planes dans la zone de la confluence (Carte 5).



Carte 5 : Réseau hydrographique et répartition de la superficie du bassin versant de la Falémé par pays (Sénégal, Mali et Guinée Conakry)

Le bassin de la Falémé est équipée de trois stations dont une au Sénégal. Il s'agit des stations de Kidira (au Sénégal), Gourbassi et Fadougou (Mali). La longueur totale du cours d'eau est de 625 km et son débit annuel d'amont en aval passe de 61,4 m³/s à Fadougou à 73,5 m³/s à Gourbassi et à 104 m³/s à Kidira (1954-2008). La contribution des sous-bassins est donnée dans le **Tableau 5** :

- Le premier sous-bassin est contrôlé par la station de Fadougou et se localise dans le cours supérieur avec une superficie totale de 9300 km². Les apports des sous-bassins et des affluents y sont estimés à 61,4 m³/s, soit 208 mm par an en moyenne.
- Le deuxième sous-bassin est contrôlé par la station de Gourbassi et se localise dans le cours moyen avec une superficie totale de 7800 km². Les apports des sous-bassins et des affluents y connaissent une baisse et sont estimés à 12,1 m³/s, soit 49 mm en moyenne. La superficie du bassin est estimée à 17100 km² entre Fadougou et Gourbassi.
- Le troisième sous-bassin est contrôlé par la station de Kidira, il se localise dans le cours inférieur avec une superficie totale de 11800 km². Les apports des sous-bassins et des affluents y enregistrent une légère hausse par rapport au sous-bassin précédent et sont estimés à 30,5 m³/s, soit 82 mm en moyenne. Le bassin couvre une superficie totale de 28900 km² entre Fadougou et Kidira.

IV.2 Les caractéristiques géologiques du bassin versant de la Falémé

Les formations géologiques de la région orientale du Sénégal ont été l'objet de divers phénomènes : puissants plissements, érosion, métamorphisme (Bassot J., 1963⁴⁴). Cela a donné naissance à des séries et des massifs caractérisés par une hétérogénéité des faciès accompagnée par un réseau intense de fractures, qui ont conféré à cette région des caractéristiques géologiques particulières. Ces formations sont d'âge birrimien ; le socle birrimien correspond à une ancienne chaîne de montagne injectée de granites qui a ensuite été nivelée (Sall M., 1983⁴⁵) et ses roches forment un noyau orogénique stable sur lequel d'autres roches plus récentes se sont déposées et fossilisées.

IV.2.1 Les unités géologiques affleurant dans le bassin

Dans le bassin de la Falémé, on peut distinguer trois unités géologiques qui sont des séries de la boutonnière Kédougou-Kéniéba. Cette boutonnière est située dans la partie la plus occidentale du craton ouest-africain entre la dorsale Réguibat au Nord et la dorsale de Géo-Man au Sud.

IV.2.1.1 Les formations birrimiennes du socle

Cette zone d'affleurement du socle laisse apparaître un ensemble de roches volcano-sédimentaires plissées, métamorphisées et granitisées au cours de l'orogénèse éburnéenne (1.850 Ma). Cet ensemble a été subdivisé en deux types de séries : la série de Bakel et les séries de Mako, Dialé et Daléma.

⁴⁴ Bassot J.-P., 1963 : *Etude géologique du Sénégal oriental de ses confins guinéo-maliens* Thèse Scie., Clermont-Ferrand., B.R.G.M. no 40I 1966, 322 p.

⁴⁵ Sall M., 1983 : *Dynamique et morphogénèse actuelles au Sénégal*. Thèse d'Etat, Univ. Louis Pasteur de Strasbourg 1.2 tomes, 604 p.

1. La série de Bakel-Akjoujt

Datée du Précambrien moyen, la série de Bakel-Akjoujt a, dans l'ensemble, une disposition monoclinale avec pendage Ouest et est constituée principalement de roches vertes, de schistes et de quartzites à structure fine. Elle affleure à 15 kilomètres à l'Ouest de Kidira, une localité se trouvant dans la série non métamorphique. La série Bakel-Akjoujt est bien représentée au Nord de Bakel et s'élargit de plus en plus au fur et à mesure que l'on progresse vers le Nord.

2. La série de Mako, Dialé et Daléma

Cette série est subdivisée en trois unités stratigraphiques (super groupes) qui sont d'Ouest en Est :

- **Le super groupe de Mako**, dans son organisation structurale, est orienté NNE-SSW sur plusieurs centaines de km. Les bordures sont redressées à la verticale et parfois déversées vers l'Est (Diouf S., 1999⁴⁶). Cet ensemble volcano-sédimentaire est recoupé par le batholite de Badon-Kakadian et par de petits massifs tarditectoniques et atectoniques de composition granodioritique. Le super groupe de Mako est plissé isoclinalement et sa stratification généralement concordante est caractérisée par des pendages sub-verticaux. Il abrite les gisements de Sabodala situés dans une zone de cisaillement intense et de silicification associée à une minéralisation pyrite aurifère.

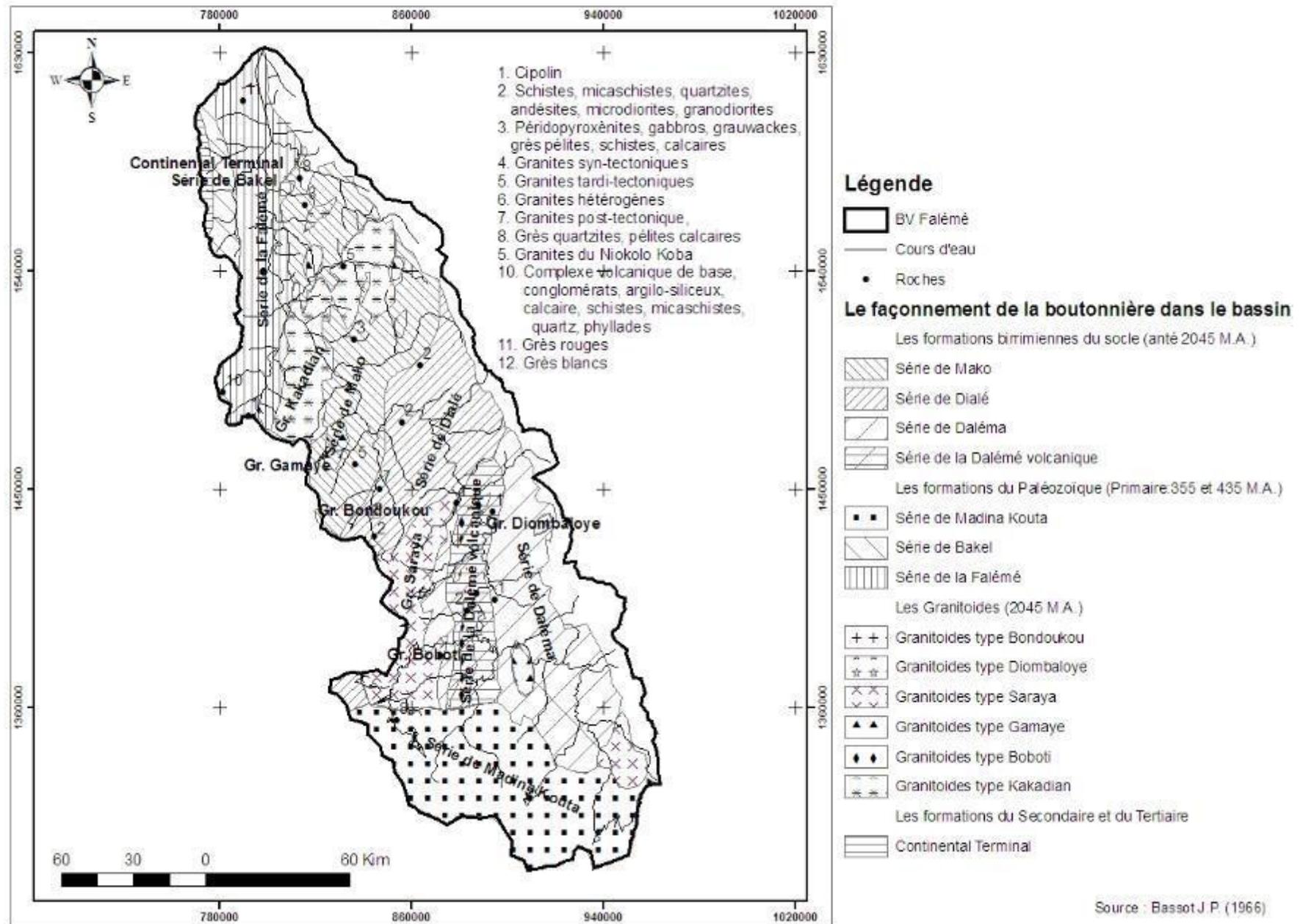
- **Les super groupes de Dialé et de Daléma** sont constitués par une importante pile de roches sédimentaires et volcano-détritiques (quartzites, grauwackes, conglomérats) à intercalations carbonatées. Ils sont recoupés par le complexe volcano-plutonique intermédiaire à acide de la Daléma. Cet ensemble est recoupé par le batholite de Saraya, les massifs granitiques de Boboti, de Gamaye et de Moussala. Les super groupes de Dialé et de Daléma sont formés d'un groupe inférieur de 2000 m de puissance (avec quartzites, schistes, cipolins) et d'un groupe supérieur de 8000 m de puissance (avec schistes, grauwackes, quartzites). Dans la série de Daléma, on note un métamorphisme de contact responsable de la formation des gisements de fer de la Falémé constitués en un chapelet de colline périer-allymi le long de la rivière.

IV.2.1.1 Les formations du Paléozoïque (Primaire)

Dans le bassin de la Falémé, les formations du paléozoïque se partagent en deux branches : une branche Ouest qui s'envoie sous les formations sédimentaires de Bowé et une autre branche orientale qui est représentée par les Rokérides (Bassot, 1969 et Villeneuve, 1984⁴⁷). Ces formations post-birrimiennes du bassin peuvent être subdivisées en deux types de séries : la série infracambrienne et les séries cambriennes.

⁴⁶ Diouf S., 1999 : *Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental* : application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du batholite de Saraya et ses environs. Dakar : ORSTOM, 158 p. multigr. Th. : Géol. Appliquée, UCAD.

⁴⁷ Villeneuve M.- 1984 : *Etude géologique sur la bordure Sud-ouest du craton Ouest-africain. (La suture Panafricaine et l'évolution des bassins sédimentaires Protérozoïques et Paléozoïque de la marge NW du continent de Gondwana)*. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Marseille, 552 p-



Carte 6 : Façonnement de la boutonnière Kédougou-Kéniéba dans le bassin de la Falémé

1. La série infracambrienne de Madina Kouta

Il s'agit d'un ensemble de grès et de pélites plus ou moins calcareuses surmontées par des tillites. Cette suite de plus de 200 m de puissance débute par des conglomérats à tendance bréchique surmontés par des calcaires oolithiques et de grès quartzeux à glauconie qui sont interstratifiées avec des pélites plus ou moins calcareuses. Sa structure est monoclinale avec des pendages inférieurs à 10° et elle est discordante sur le socle birrimien.

2. Les séries cambriennes

Elles sont de deux catégories dans le bassin de la Falémé : la série de Bakel et la série de la Falémé.

- **La série de Bakel** : elle constitue le prolongement vers le Nord des séries de Koulountou, de Youkounkoun et des Bassaris. La partie orientale de la série est à faciès sériciteux qui passe progressivement à la série de la Falémé et la partie occidentale est caractérisée par des faciès à muscovite. Cette série semble être l'équivalent métamorphique de la série de la Falémé.

- **La série de la Falémé** : identifiée sous le nom de "groupe de termesse", elle s'allonge du Nord de Kidira, un peu avant Bakel, jusqu'au Sud en se poursuivant par la série du Mali et la série des Bassaris. Elle se compose de pélites, d'argiles et de conglomérats. Elle comprend une unité volcanique acide, basique, très épaisse coiffée par des tillites, des dolomites calcaires de pélites, des ciments, des grauwackes et des jaspes sous-jacents à des grès. Ces terrains non métamorphisés et d'aspect monoclinale ont une structure synclinale déversée vers l'Est. Les grès rouges occupent le cœur du synclinal.

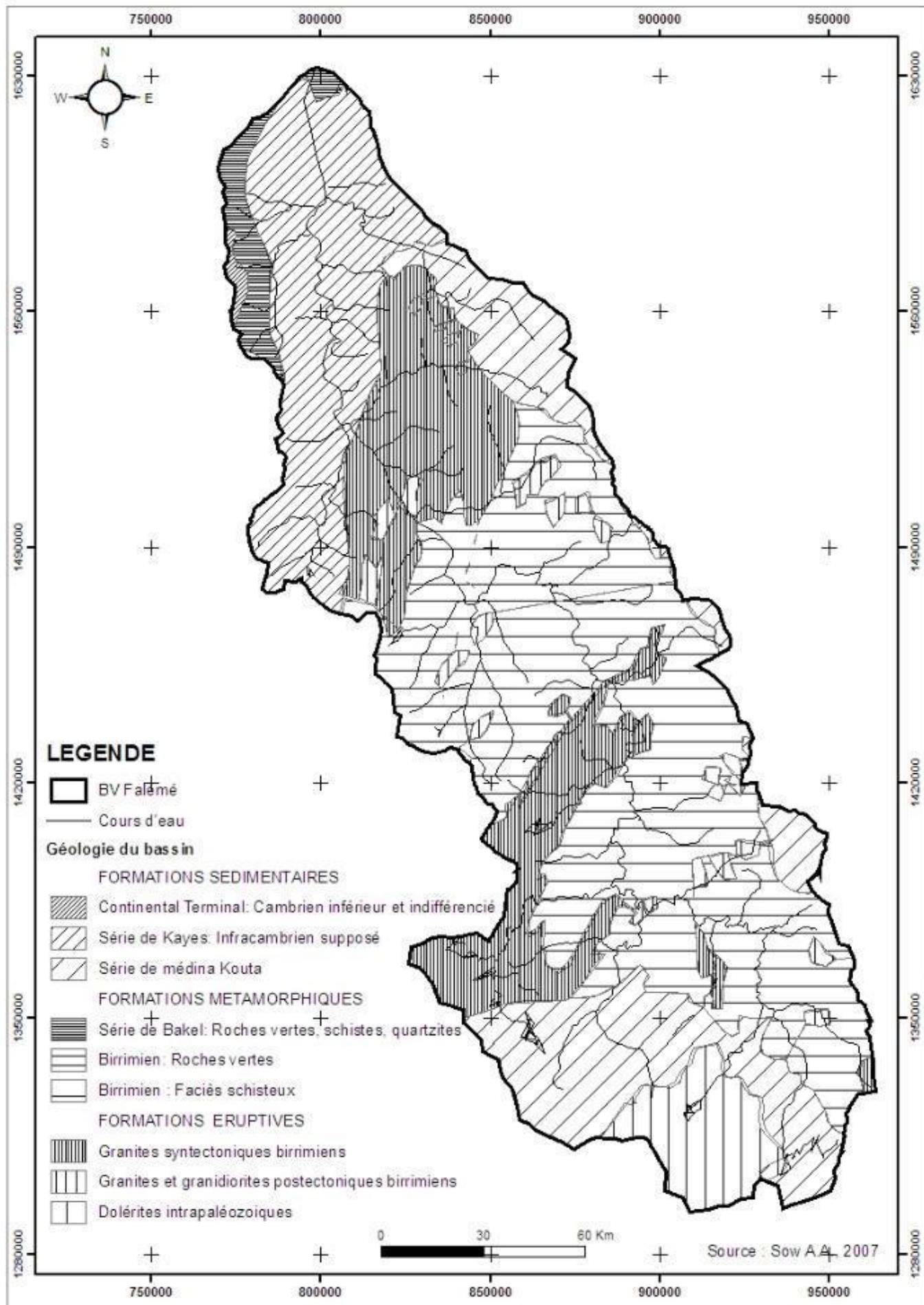
IV.2.1.2 Les formations du Secondaire et du Tertiaire

Dans le bassin de la Falémé, les formations sédimentaires du Secondaire et du Tertiaire du Continental Terminal apparaissent dans la zone de Goudiry et ont une perméabilité nettement supérieure à celle des terrains anciens. Ces sables argileux et grès continentaux contiennent une nappe continue dans le bassin sédimentaire. Cependant à l'Est, le dépôt des terrains post-paléozoïques de faible épaisseur s'est effectué sur la surface d'érosion du vieux continent.

Le dépôt alluvionnaire du bassin est relativement faible, même si on assiste actuellement au recouvrement des lits mineurs aboutissant à des dépôts alluvionnaires, morcelés, peu épais, séparés par des biefs où le bed-rock affleure.

IV.2.2 Les roches du bassin

L'esquisse géologique du bassin versant de la Falémé permet de distinguer trois types de roches (**Carte 7**) : les roches éruptives, les roches métamorphiques et les roches sédimentaires.



Carte 7 : Esquisse géologique du bassin versant de la Falémé (Source Sow A. A. 2007)

IV.2.2.1 Les roches éruptives

Dans le bassin versant de la Falémé, les roches éruptives sont de trois types :

- Les roches de granites et de granidiorites postectoniques du Birrimien faiblement présentes et rencontrées à 5 km à l'Est de Bagni-bagni, de Nafadji et à Médina Baffé ;
- Les roches de granites syntectoniques birrimiens occupant la tranche occidentale, en particulier la partie sénégalaise dans les localités de Saraya, Kondoukhou, Barahéri, Bagni-bagni ;
- Les roches de dolérites intrapaléozoïques localisées seulement dans la partie méridionale du bassin, particulièrement dans le haut bassin.

IV.2.2.2 Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques sont beaucoup plus représentées dans le bassin de la Falémé et sont aussi de trois types :

- Les roches de la série de Bakel (roches vertes, schistes et quartzites) apparaissant dans la partie Nord du bassin (zone de confluence) à Saroudia, Satadougou, Baytilaye, Frandi... ;
- Les roches du Birrimien (roches vertes) présentes aux environs de Saraya, mais faiblement représentées dans le bassin ;
- Les roches du Birrimien (roches schisteux) occupant une bonne partie du bassin, surtout la zone centrale de la partie Sud.

IV.2.2.3 Les roches sédimentaires

Dans le bassin versant de la Falémé, les roches sédimentaires sont également de trois types :

- Les roches du Continental Terminal, du Cambrien inférieur et du Cambrien faiblement représentées et concentrées dans le Nord-ouest du bassin (à Koussane) ;
- Les roches de la série de Kayes (Cambrien supposé) présentes dans les localités de Goulomgua, Bankouta, Sansandé, Tamboura, Médina, Naye... ;
- Les roches de la série de Madina Kouta occupant toute la bande orientale du bassin : parties malienne et guinéenne (contreforts du Fouta Djallon).

Ces formations birrimiennes et paléozoïques du socle affleurent respectivement, en position anticlinale et en position synclinale, avec des roches du Cambrien supérieur, du Cambrien inférieur de l'Infracambrien. Le Continental Terminal quant à lui, faiblement représenté dans la partie sénégalaise du bassin, est formé par les dépôts d'une nappe détritique à faciès gréseux.

L'étude de la géologie de la Falémé s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques hydrogéologiques, physiographiques, pédologiques et biogéographiques. La géologie du substratum agit doublement au sein du bassin versant de la Falémé (à la fois sur l'écoulement souterrain et superficiel). Ainsi Bravard et al. (2000)⁴⁸ indiquent que « *les caractères hydrologiques d'un bassin sont dans une large mesure influencés par la capacité qu'ont les roches qui le composent d'absorber l'eau et de la retenir de manière temporaire* ». L'imperméabilité d'ensemble des terrains anciens du bassin est la cause première du développement important de son réseau hydrographique.

IV.3 Les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de la Falémé

Les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de la Falémé influencent fortement son hydrologie. De ce fait, la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations sont influencées par diverses caractéristiques physiographiques.

IV.3.1 Les grands traits de la géomorphologie

Les grands traits de la géomorphologie qui caractérisent le bassin ont été bien étudiés dans le passé. Les mouvements épeirogéniques poursuivis durant le quaternaire ancien sont accentués par des changements du climat pendant le quaternaire récent et sont à l'origine du façonnement du modelé. Ce phénomène de cuirassement et son influence sur la géomorphologie des bassins sénégalo-gambiens a été bien étudié par Michel P (1959)⁴⁹. Les différentes phases de cuirassement caractérisent à la fois la nature géomorphologique du bassin versant et du réseau hydrographique, indiquant du coup l'organisation de l'écoulement dans l'hydrosystème de la Falémé, mais aussi l'établissement de paysage. Michel (1973)⁵⁰ distingue trois vieilles surfaces d'aplanissement formées au secondaire et au tertiaire et séparées soit par un relief intermédiaire, soit par des glacis et ou des terrasses d'âge quaternaire (**Figure 6**) : la **première surface** (celle de Labé entre 1150 m et 1200 m d'altitude), la **deuxième surface** (celle de Dongol Sigon entre 850 m et 1000 m) et la **troisième surface** (celle de Fantofa entre 550 et 650 m). Parmi les trois, seule la troisième surface demeure la pénéplaine qui apparaît dans le bassin de la Falémé aux environs de Fantofa.

Les matériaux de glacis et de terrasses graveleuses d'âge quaternaire se retrouvent dans le lit de la Falémé (**Figure 6**).

⁴⁸ Bravard J. P. et Petit F., 2000 : Les cours d'eaux, Dynamique du système fluvial, Armand Colin, deuxième édition, Paris, 222.

⁴⁹ Michel P., 1959 : « *L'évolution morphologique des bassins du Sénégal et de la Haute Gambie. Ses rapports avec la prospection minière* ». In Revue de Géographie physique et de Géologie Dynamique Française, tome 10, n°5-12, pp. 117- 143.

⁵⁰ Michel P., 1973 : *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique*, doctorat d'Etat, ORSTOM, n°63, 753 p, 170 figures, cartes et photos.

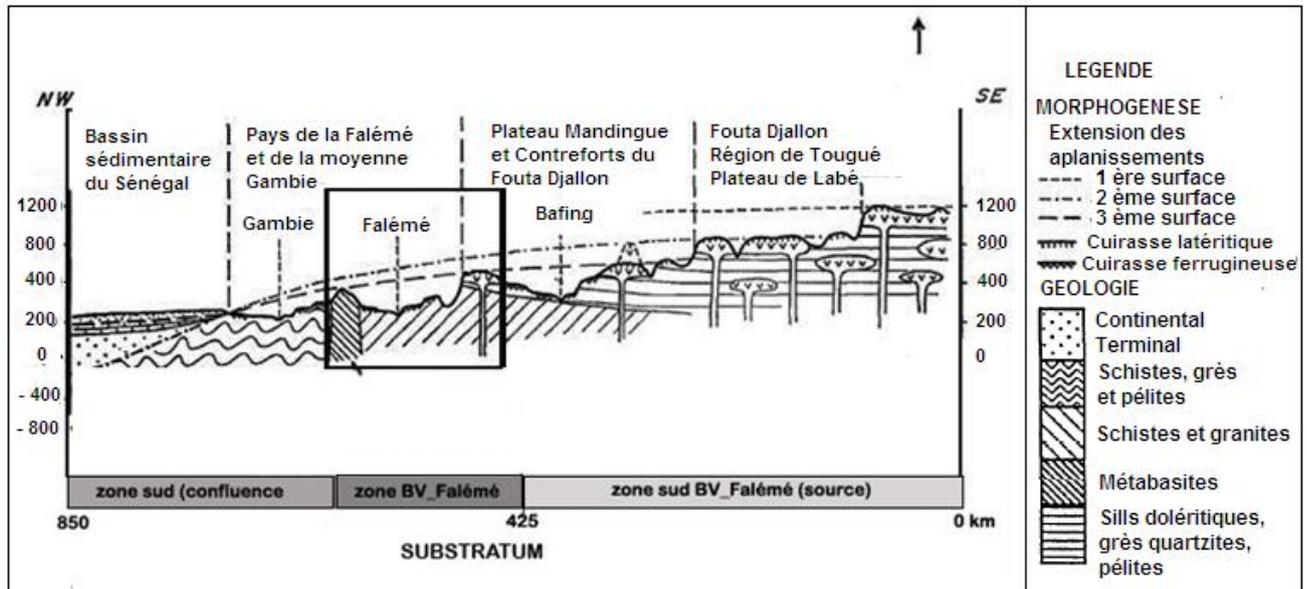


Figure 6 : Coupe schématique du relief des hauts bassins (région de la Falémé) portant des lambeaux cuirassés de vieilles surfaces (Source Michel, 1973, adaptée au bassin)

IV.3.2 Les caractéristiques de forme et le relief du bassin

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire et les indices de pentes donnent une idée sur le caractère de l'écoulement.

1. L'indice de compacité de Gravelius Kc

L'indice de compacité est l'une des caractéristiques de forme les plus essentielles d'un bassin versant car permettant l'évaluation globale du réseau de drainage. Cet indice Kc est estimé pour le bassin de la Falémé à 1,57. Il témoigne de la forme allongée du bassin qui s'étire du Sud vers le Nord.

2. Les indices de pente

Il s'agit de la pente moyenne et de l'indice de pente de Roche :

2.1. La pente moyenne du bassin

Dans son cours supérieur, la Falémé descend de 600 m sur 70 km, d'où une forte pente de 8.57 % qui diminue jusqu'à 0.015 % près de la confluence (Sow AA, 2007⁵¹). On note avec Sow A.A. (2007) que les affluents du cours supérieur ont des pentes très fortes : 5% pour le Doundi long de 70 km ; 4.91 % pour le Kouloun ko long de 56 km. La pente passe à 3.8 % pour le Balinn ko qui mesure 165 km, et à 3.13 % pour le Koila kabé long de 182 km. Les altitudes aux confluences de ces deux affluents avec le cours principal de la Falémé sont respectivement de 115 et 110 m (Figure 7).

⁵¹ Sow, AA, 2007 : L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé, Thèse doctorat d'Etat es Lettres et Sciences Humaines, UCAD, FLSH, Département de Géographie, 1232 p

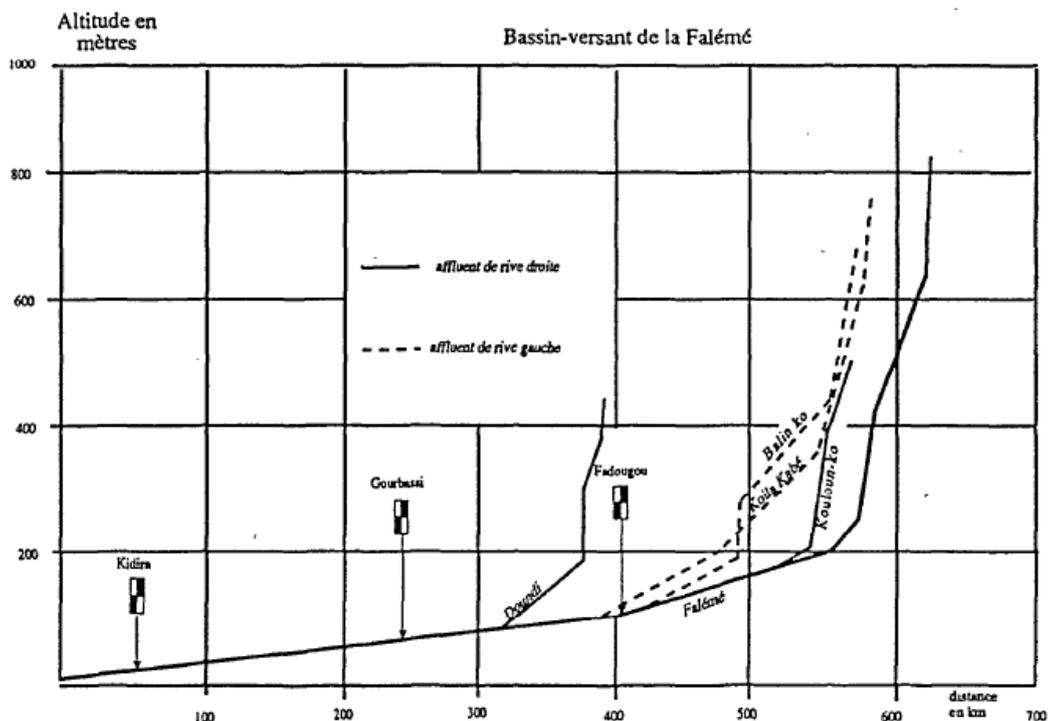


Figure 7 : Profil en long schématique du bassin versant de la Falémé (Rochette, 1974)⁵²

A la confluence du cours principal avec le fleuve Sénégal, l'altitude n'est plus que de 18 m et la pente de 1.25 %. Ces pentes varient avec le dénivelé qui est d'autant plus important que le cours du fleuve est long de 625 km et sa pente faible. Dans l'ensemble du bassin, les dénivelés se situent entre 275 m et 782 m.

Tableau 6 : Paramètres morphométriques du bassin versant de la Falémé (Rochette, 1974)

Paramètres	Sous bassins			Quelques affluents			
	Falémé à Fadougou	Falémé à Gourbassi	Falémé à Kidira	Koulounko	Balinnko	Koila kabé	Doundi
Latitude (N)	12°31	13°24	14°27	-	-	-	-
Longitude (O)	11°23	11°38	12°13	-	-	-	-
Altitude échelle (en m)	119	79	35	-	-	-	-
Superficie du bassin (en km ²)	9300	17100	28900	-	-	-	-
Longueur du cours d'eau (en km)			625	56	165	182	70
Altitude maximum (en m)	906	906	906	500	750	680	450
Altitude minimum (en m)	119	79	18	225	115	110	100
Dénivelé (en m)	787	827	888	275	635	570	350
Pente moyenne IG (m/km)	3.72	2.3	1.5	4,91	3,85	3,13	5,00
Ip	0.073	0.05	0.033	-	-	-	-
P (km) rectangle équivalent (en km)	418	625	938	-	-	-	-
L. (km) rectangle équivalent (en km)	145	248	396	-	-	-	-
l. (km) rectangle équivalent (en km)	64	64	73	-	-	-	-
Kc	1.21	1.39	1,556	-	-	-	-
Temps de concentration (en h)	151,5	580,2	735,3	-	-	-	-

Pente moyenne du cours d'eau = Dénivelé/longueur du cours d'eau, P = périmètre, l = longueur, l = largeur kc = coefficient de compacité, Ip = indice de pente de Roche

⁵² Rochette, 1974 : Monographie hydrologique du fleuve Sénégal. Coll. Mém. ORSTOM, 442 p.

La pente hydrographique encore appelée profil en long du cours d'eau varie plus ou moins irrégulièrement pour ce même cours d'eau de la Falémé et s'affaiblit généralement d'amont en aval. Cette pente moyenne est de 1,25 m/km² pour le bassin de la Falémé.

1.1. L'indice de pente de Roche

Le **Tableau 6** ci-dessous donne les caractéristiques des différents sous bassins de la Falémé. L'indice de pente de Roche est de 0.033 ‰ pour la Falémé et traduit la forme générale de la déclivité de son bassin (Roche M., 1963)⁵³.

IV.3.3 Le relief du bassin versant

La courbe hypsométrique, utilisée pour analyser le relief, représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction des altitudes (**Tableau 7**).

Tableau 7 : Répartition hypsométrique dans le bassin versant de la Falémé (Source : srtm.csi.cgiar.org)

Haute Falémé		Moyenne Falémé		Basse Falémé		Total Bassin versant	
Altitude en m	Élévation en %	Altitude en m	Élévation en %	Altitude en m	Élévation en %	Altitude en m	Élévation en %
120 – 201	100	73-137	100	18- 55	100	18 – 107	100
201 – 283	90,44	137-202	90,12	55- 97	89,28	107 - 200	89,07
283 – 365	80,89	202-267	80,24	97- 139	78,57	200 - 294	78,14
365– 446	71,34	267-332	70,37	139 - 181	67,86	294 - 387	67,21
446– 528	61,79	332-397	60,49	181- 222	57,15	387- 481	56,28
528- 610	52,24	397-462	50,61	222- 264	46,43	481- 574	45,35
610- 691	42,69	462-527	40,74	264 - 306	35,72	574 - 668	34,42
691 – 773	33,13	527-592	30,86	306 - 348	23,49	668 - 761	23,49
773 – 855	23,58	592-657	20,98	348 - 390	14,30	761 - 855	12,56
800 – 906	0,6	-	-	-	-	800 - 906	0,1

Trois régions naturelles se suivent :

- Dans la **basse Falémé**, les altitudes du bassin sont les plus basses, le minimum est de 18 m et le maximum de 390 m. Seulement, 14,30 % de la superficie du bassin ont des altitudes supérieures ou égales à 348 m alors que 89,3 % de la superficie ont des altitudes inférieures à 100 m.
- Dans la **moyenne Falémé**, l'altitude minimale est de 73 m et le maximum de 657 m. 20,98 % ont une altitude supérieure ou égale à 527 m.
- Dans la **haute Falémé**, elles sont généralement plus élevées, le maximum atteint plus de 900 m. 0,6% de la superficie totale du bassin portent une altitude supérieure à 800 m, 23,5 % une altitude supérieure ou égale à 691 m avec un minimum qui s'établit à 120 m.

⁵³ Roche M., 1963 : « Hydrologie de surface » ORSTOM et Gauthier- Villars Ed. PARIS (Cf. chap. III : Le complexe physique du bassin versant).

La **Figure 8** confirme la configuration décrite ci-avant avec des altitudes d'ensemble qui se situent entre 910 m et 18 m. Le point culminant dans le bassin est supérieur à 800 m (le Bowal de Vermini atteint 906 m) et le point le plus bas descend à 18 m, d'où une dénivellation de 782 m.

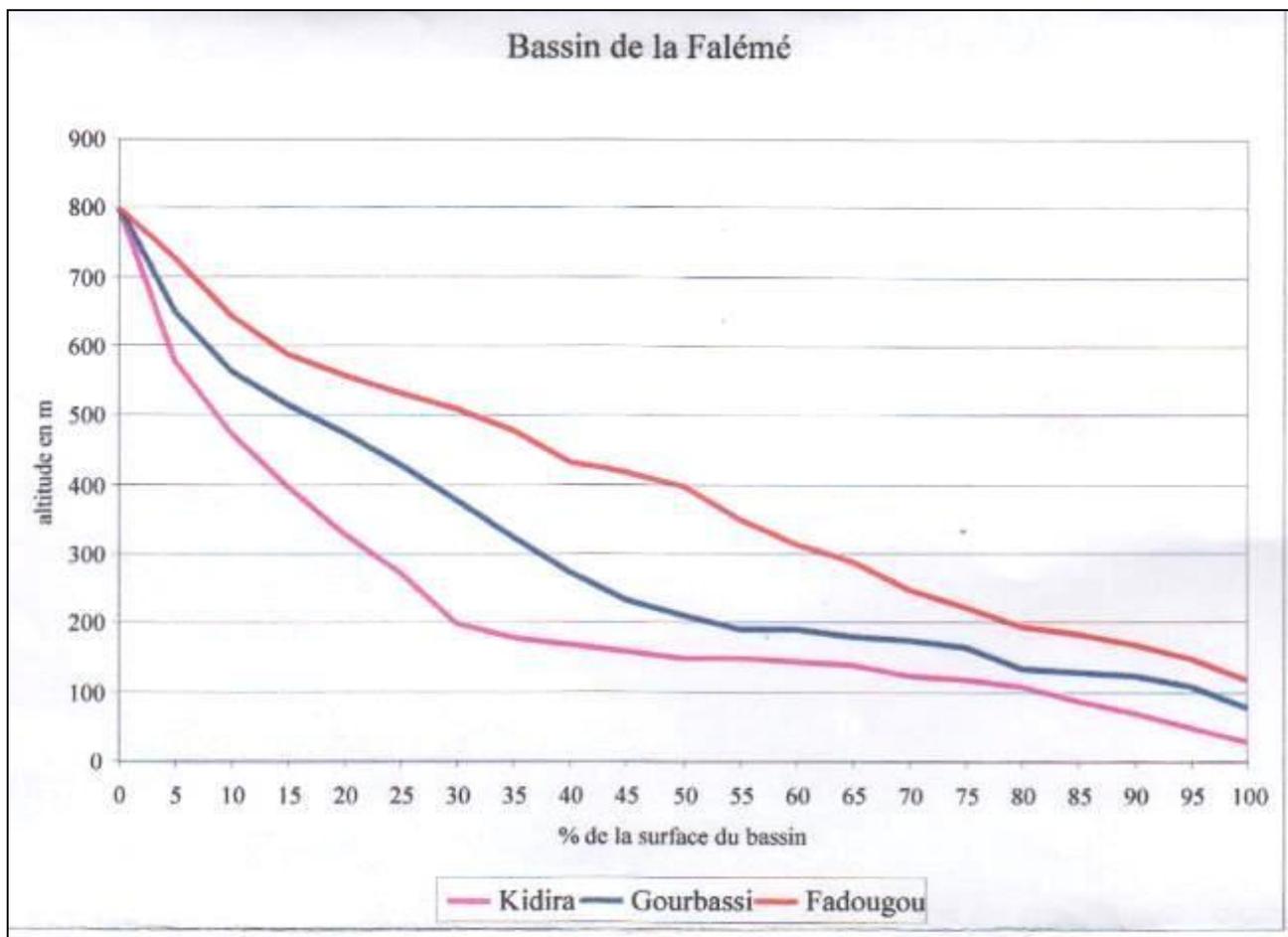
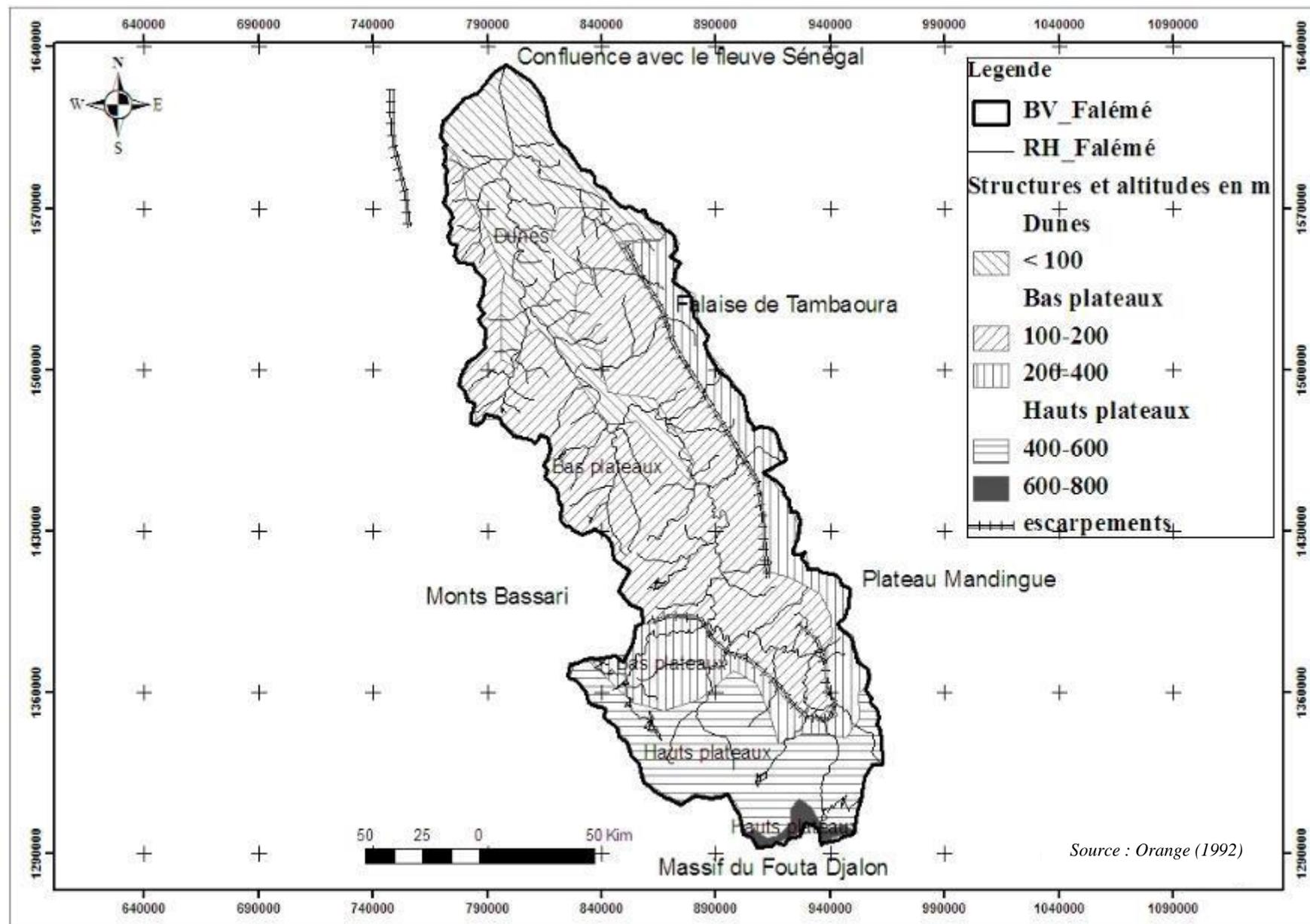


Figure 8 : Hypsométrie du bassin de la Falémé (Source : Sow A.A., 2007)

Le bassin de la Falémé est limité à l'Ouest par l'escarpement prolongeant les Monts Bassari; à l'Est par la Falaise de Tambaoura qui termine le Plateau Mandingue, au Sud par les contreforts septentrionaux du massif du Fouta Djallon et enfin au Nord par le fleuve Sénégal à 30 km en amont de Bakel (**Carte 8**).

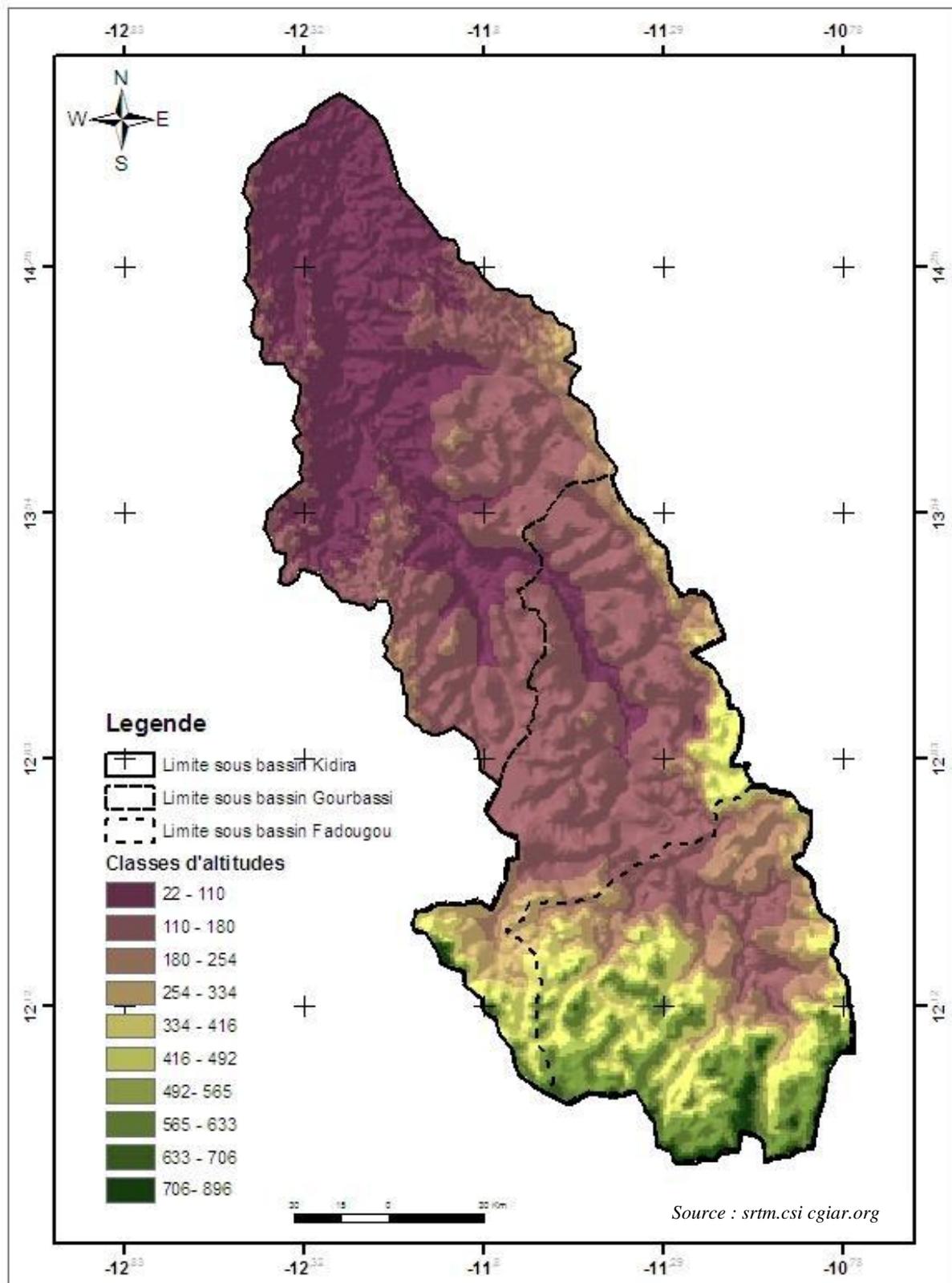
Les altitudes caractéristiques du bassin versant de la Falémé permettent de distinguer trois régions naturelles (**Carte 8** et **Carte 9**) :

- **La région naturelle à hautes altitudes** se situe entre 12° et 13° N, au niveau des contreforts septentrionaux du Fouta Djallon où s'étendent collines et plateaux (Médina Kadé) avec des altitudes qui culminent à 906 m. Au cœur du massif, les petits cours d'eau circulent dans des vallons larges et peu profonds, suivis par de grandes rivières occupant souvent de vastes bassins (Michel, 1973). Ces rivières forment la plupart des fleuves du bassin sénégal-mauritanien, comme la Falémé.



Carte 8 : Relief du bassin versant de la Falémé (Source Orange, 1992)

- **La région naturelle à moyennes altitudes** se situe entre 13° et 14°N, avec des altitudes variables plus modestes, dépassant quelquefois 350 m. Le point culminant dans cette région naturelle se trouve à 516 m à l'Est de Sabodala. On y trouve le Plateau Mandingue qui fait suite au Fouta Djalon vers le Nord-est, à partir duquel des paysages monotones se déroulent, traversés par de grandes rivières. La Falémé en est un exemple (Michel, 1973).



Carte 9 : Modèle Numérique d'Altitude du bassin versant de la Falémé

- **La région naturelle** aux altitudes les plus faibles (18 à 90 m) est marquée par des plateaux abrupts qui bordent les vallées du fleuve à l'Est. Le modelé s'aplatit dans la région de Kayes et vers la confluence de la Falémé avec le fleuve Sénégal. Des dépôts plus sableux s'étirent le long du lit mineur (Michel, 1973).

Le relief de la Falémé peut être qualifié de très fort, les valeurs de la dénivelée spécifique étant supérieures à 700 m.

IV.3.4 L'analyse statistique des données géomorphologiques (Application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP))

La méthode a été appliquée sur 7 individus ou sous-bassins versants (cf **Tableau 10**) et 11 variables physiographiques. Les variables utilisées sont : la surface du bassin (SUP), le périmètre (Pkm), l'indice de compacité de Gravelius (Kg), la longueur (Lkm) et la largeur (lkm) du rectangle équivalent, la pente moyenne (S), l'indice de pente de Roche (Ip), la longueur du cours d'eau principal (LON), la densité de drainage (D), l'altitude minimale (ALTN) et l'altitude maximale (ALTX).

La reconstitution finale de la distribution des sous-bassins versants a permis de définir les axes factoriels ou facteurs responsables de cette distribution et par conséquent, de faire ressortir les affinités entre les différents sous-bassins versants et d'en déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux. Les trois premiers axes expriment 96,7% de la variance totale, avec 65,3% pour le premier facteur, 28,6% pour le deuxième facteur et 2,8% pour le troisième facteur.

Le **Tableau 8** donne les valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation, le pourcentage de variance expliquée ainsi que celui de la variance cumulée par chacun des axes.

Tableau 8: Valeurs propres, pourcentage et cumul

Axe	Valeur propre	% variance	% cumulé
Axe I	7,18	65,3	65,3
Axe II	3,14	28,5	93,9
Axe III	0,32	2,89	96,7

L'analyse de la matrice de corrélations entre les variables montre que la surface du bassin (SUP), le périmètre (Pkm), la longueur (Lkm), la largeur (lkm) du rectangle équivalent et l'indice de compacité de Gravelius (Kg) sont fortement liés entre eux (**Tableau 9**).

L'axe I détermine le maximum d'inertie du nuage et donc de la variance, l'axe II le maximum de variance restante et l'axe III le maximum d'inertie restante. La matrice de corrélation montre que l'axe I présente les meilleurs coefficients, partout supérieurs à 0,70 à l'exception de l'altitude maximale (ALTX : 0,34) et la dénivelée (D : 0,46) (**Tableau 10**).

Tableau 9: Matrice de corrélations entre les variables

	SUP	LONG	ALT X	ALT N	D	S	Ip	P (km)	L (km)	I (km)	Kg
SUP	1										
LONG	0,651	1									
ALT X	0,000	0,682	1								
ALT N	-0,476	-0,778	-0,605	1							
D	0,124	0,762	0,978	-0,757	1						
S	-0,484	-0,862	-0,826	0,779	-0,880	1					
Ip	-0,979	-0,581	0,000	0,466	-0,121	0,502	1				
P (km)	1,000	0,651	0,000	-0,476	0,124	-0,484	-0,979	1			
L (km)	1,000	0,647	0,000	-0,476	0,124	-0,486	-0,982	1,000	1		
I (km)	0,919	0,709	0,000	-0,437	0,114	-0,390	-0,820	0,919	0,913	1	
Kg	0,990	0,606	0,000	-0,471	0,123	-0,499	-0,998	0,990	0,992	0,854	1

Les coefficients sont en revanche moins élevés pour l'axe II sauf pour l'altitude maximale et la dénivelée, et très faibles pour l'axe III (Tableau 10).

Tableau 10: Corrélations entre les variables et les axes principaux

Descripteurs	Coordonnées des variables		
	Axe I	Axe II	Axe III
<i>Variables</i>			
SUP	0,94	-0,35	-0,01
LONG	0,86	0,42	0,28
ALT X	0,34	0,92	0,04
ALT N	-0,71	-0,5	0,15
D	0,46	0,89	-0,01
Pente	-0,74	-0,62	0,14
Ip	-0,91	0,34	0,2
P (km)	0,94	-0,35	-0,01
L (km)	0,94	-0,35	-0,02
I (km)	0,87	-0,32	0,37
Kg	0,92	-0,35	-0,14

L'Analyse en Composantes Principales, exprimée dans les Tableau 9 et Tableau 10, mettent en évidence les affinités entre les différents sous-bassins versants (Figure 9).

Le cercle I-II des variables (93.85% de l'inertie cumulée) : l'axe I est déterminé par les paramètres de dimension tels que la surface du bassin (SUP), le périmètre (Pkm), la longueur du cours d'eau, (LONG), l'indice de compacité de Gravelius (Kg), la longueur (Lkm) et la largeur (lkm) du rectangle équivalent, qui sont opposés à l'hypsométrie surtout l'indice de pente de Roche (Ip). L'axe II porte positivement l'altitude maximale (ALT X) et la dénivelée (D) qui sont légèrement opposées à l'altitude minimale (ALT N) et à la pente (S).

Le cercle I-III des variables (68.20% de l'inertie cumulée) : L'axe I a la même signification que précédemment suivi de l'altitude maximale (ALT X) et de la dénivelée (D). Ils sont opposés surtout à l'indice de pente de Roche (Ip), l'altitude minimale (ALT N) et la pente (S). Quant à l'axe III, il n'apporte aucune information supplémentaire parce que ne portant aucune variable.

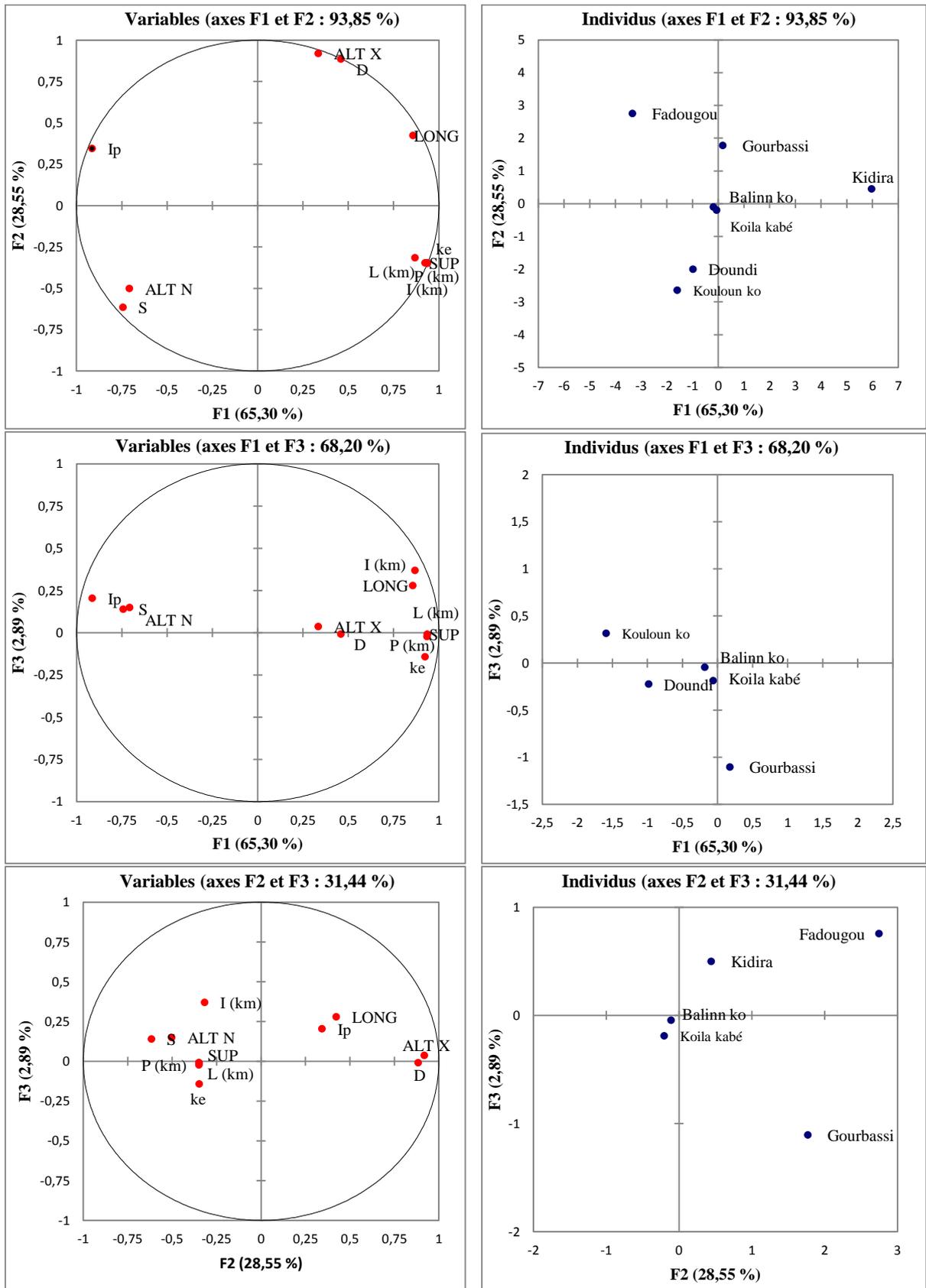


Figure 9: Représentation graphique de l'Analyse en Composantes Principales

Le cercle II-III des variables : L'axe II oppose plus nettement ALTX et D à ALTN et S. L'axe III a la même signification que précédemment (Cercle I-III) alors que les paramètres de dimension et hypsométriques sont localisés au centre du cercle et n'apportent pas d'informations.

Dans le plan des unités statistiques, le plan I-II met en évidence trois groupes : le premier formé par les sous-bassins versants de Gourbassi et de Kidira caractérisés par les plus fortes valeurs de forme ; le sous-bassin versant de Kidira (exutoire du bassin se détache nettement de celui de Gourbassi en raison de sa plus grande superficie.

Le second groupe est représenté par le sous-bassin versant de Kouloun ko Balinn ko, Koila kabé, Doundi correspondant aux plus faibles valeurs de forme avec des valeurs relativement importantes de la pente moyenne (S) et de la densité de drainage (D). Le troisième groupe est constitué par le sous-bassin versant de Fadougou caractérisé par un fort coefficient de Gravelius et opposé au premier groupe formé par les sous bassins versants de Gourbassi et Kidira.

Dans le plan I-III, l'axe III permet de distinguer deux groupes d'unités statistiques : le premier composé par le sous bassin versant situé à l'exutoire (Kidira) ; le second composé de tous les autres sous bassins qui sont plus ou moins dispersés tout autour du centre.

Dans le plan II-III, la répartition des individus est plus confuse et se fait suivant l'axe II. Cet axe permet de distinguer deux groupes d'unités statistiques : un premier groupe composé par les sous-bassins versants de Fadougou, Gourbassi, Kidira, Koila kabé et Balinn ko, opposés à un deuxième groupe composé des sous-bassins de Kouloun ko et Doundi.

En définitive, l'analyse multidimensionnelle, en analyses en composantes principales (ACP), a produit un résumé d'information par l'établissement d'une similarité entre les sous-bassins versants, la recherche de groupes de sous-bassins versants homogène, la mise en évidence d'une typologie de sous-bassins versants et de paramètres physiographiques, mais aussi la mise en évidence de liens de liaisons entre paramètres physiographiques, moyennant des paramètres ou variables synthétiques.

IV.4 Les caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant de la Falémé

Les terrains du bassin de la Falémé ont des caractéristiques hydrogéologiques particulières (Diouf S., 1999). L'augmentation de l'écoulement annuel ne se réalise que si l'infiltration et l'alimentation du sous-écoulement sont possibles.

Le **Tableau 11** montre que sur le cours supérieur, les formations dominantes sont à base de granites, dolérites et gabbros. Elles ont une influence très importante puisqu'elles sont toutes considérées comme imperméables, favorisant un écoulement rapide. Sur le cours moyen, les terrains paléozoïques à base de schistes, grès, calcaires n'ont qu'une importance relative sur le processus hydrologique avec certaines unités géologiques apparentées à celles du cours supérieur. Ce caractère d'imperméabilité est toutefois limitant dans le processus hydrologique du cours supérieur et moyen puisqu'il consacre l'inexistence de nappes capables de soutenir l'écoulement en période d'étiage. Sur le cours inférieur,

des unités propres au Continental Terminal formées de sables et grès tendres, réagissent en fonction de leur caractère (perméabilité et possibilité d'aquifères) et cette influence s'en trouve inversée.

Tableau 11 : Hydrogéologie du bassin de la Falémé d'après Marvier L. (1952) ; Dubreuil P. et Guiscafne R. (1971) et Sow A .A. (1984)⁵⁴, cités par Dione, O. (1996)⁵⁵

Formations		Faciès	Classes	Caractères hydrogéologiques
Bassin sédimentaire	Continental Terminal	Grès argileux, sables	P2	Nappes dunaires, alluviales
Formations paléozoïques	Infracambrien	Schistes	P3	Normalement imperméables par des nappes interstratifiées sauf rares exceptions
	Ordovicien	Grès quartzites et roches diverses	P4	
	Cambrien	Schistes, grès calcaires	P4	
Formations du socle	Roches métamorphiques	Schistes quartzites et calcaires	P6	Imperméables, sauf dans les franges d'altérations
	Roches basiques	Dolérites et gabbro	P7	

A travers la classification hydrogéologique faite à partir des travaux de l'ORSTOM (Dubreuil P., et Guiscafne R., 1971) retenus par Sow A. A. (1984) et Dione, O. (1996), 5 classes affleurent dans le bassin de la Falémé (**Tableau 11**) :

- la P2 constituée de roches à perméabilité d'interstice, avec des sables et grès, où les nappes drainent les rivières ;
- la P3 caractérisée par une alternance de roches perméables et imperméables, ou de roches perméables comporte de l'argile (grès argileux, calcaires argileux) sur plusieurs mètres ;
- la P4 composée de roches à circulation fissurée, genre calcaires fissurés, grès, quartzites ;
- la P6 qui est un groupe des roches cristallines et cristallophylliennes, susceptibles de renfermer des niveaux aquifères. Elles se rencontrent surtout dans les régions à faciès schisteux dominant, sur les granites et granodiorites ;
- enfin la P7, un groupe des roches recristallisées totalement imperméables (quartzites, dolérites).

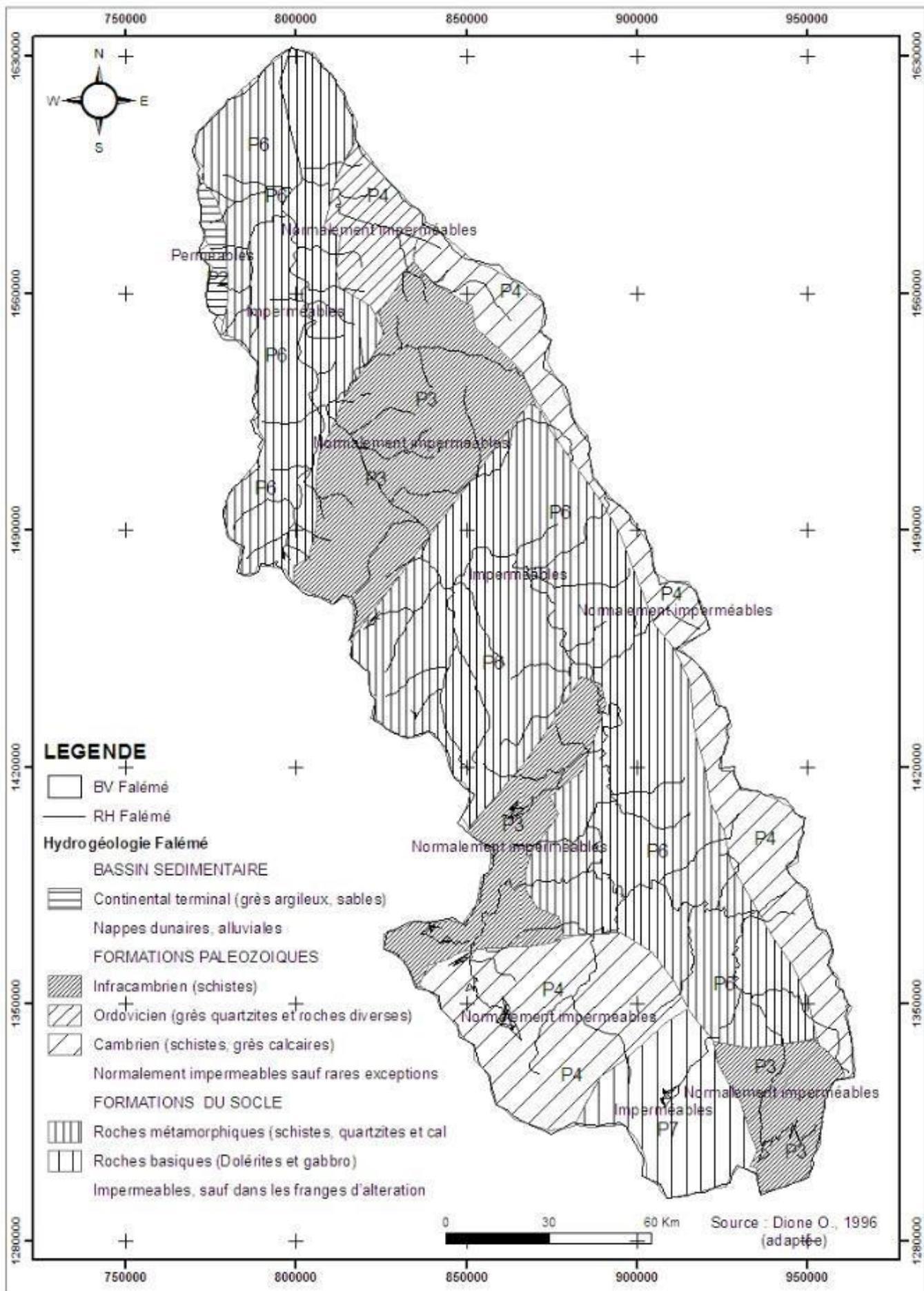
La lithologie du bassin (**Tableau 11** et **Carte 10**) en majeure partie est composée de roches imperméables caractérisées par de faibles aptitudes pour le stockage de l'eau dans des réserves souterraines par infiltration. Seuls les interstices et manteaux d'altération des roches peuvent contenir des réserves superficielles (surtout les roches métamorphiques très sensibles à l'érosion). Ces réserves sont très localisées et de faible importance.

Les caractéristiques hydrogéologiques des terrains du bassin versant de la Falémé sont peu favorables à la constitution de réserves importantes. Les roches éruptives et métamorphiques ont longtemps été considérées comme peu favorables à l'existence de nappes importantes. A l'état sain et massif, ces roches présentent une porosité nulle à négligeable (Shooller, 1963 cité par Orange, 1990⁵⁶).

⁵⁴ Sow A. A. -1984- Pluies et Ecoulement dans le bassin du fleuve'Sénégal. Contribution a l'hydrologie en domaine fluvial tropical humide africain. M Thèse de doctorat 3e cycle, Nancy II, 442 p.

⁵⁵ Dione O, 1996. Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie, Lyon : Université Lyon III, Thèse doct Univ.; 415 p.

⁵⁶ Orange D, 1990 : Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest), Sciences Géologiques, mémoire N° 93 U.L.P. C.N.R.S., ORSTOM, 198 p



Carte 10 : Esquisse hydrogéologique du bassin versant de la Falém (Source L. Marvier., 1952 ; P Dubreuil et R. Guiscafre, 1971 et A .A. Sow, 1984 cités par Dione, O., 1996)

La productivité des aquifères est tributaire de leur degré de fissuration, de fracturation ou de leurs caractéristiques pétrographiques, mais aussi de l'âge des terrains et de leur degré d'érosion. Deux types de formations aquifères se distinguent :

- les nappes superficielles contenues d'une part dans les nappes colluvio-alluviales perchées et d'autre part dans les altérites argileuses ou sableuses (nappes discontinues et peu étendues),
- les nappes peu profondes de la zone fissurée ou faillée du substratum cristallin ou cristallophyllien.

Selon Orange (1990), le caractère fondamental de la zone étudiée est l'absence de ressources en eau souterraines généralisées. Il n'existe aucune nappe profonde, les seules existantes sont celles de la zone d'altération, ne dépassant jamais 100 m de profondeur de la couverture sédimentaire et les formations récentes (alluvions, éluvions, latérites). Ces aquifères sont discontinus et présentent une forte hétérogénéité verticale en fonction de la stratification des zones perméables, donnant naissance à des nappes semi-captives ou captives.

Dans cette zone de terrains anciens, les seules nappes peu importantes et très localisées se rechargent annuellement malgré le déficit pluviométrique actuel de la région (Traoré, 1995)⁵⁷. Le bassin de la Falémé présente les mêmes caractères hydrogéologiques sur ces 28900 km² de superficie. Deux périodes dominant dans la trame hydrogéologique du bassin (**Carte 10**) :

- Les formations du Cambrien et du Silurien non différenciées qui occupent 25 % du bassin avec les grès et les schistes dolomitiques de la basse Falémé.
- Les formations du Paléozoïque qui se répartissent en deux types de roches : les roches métamorphiques qui occupent 50 % des terrains du bassin par les quartzites et les schistes de la pénéplaine de la moyenne Falémé ; les roches éruptives qui prédominent sur 25 % des terrains de la haute Falémé avec des granito-gneissique.

Le long des vallées alluviales de la Falémé, les aquifères (superficielles et peu profondes) qui existent sur les couches du Continental Terminal s'épuisent au fur et à mesure que se prolonge la période d'étiage. Toutefois, l'étude du tarissement permet de noter l'existence et l'importance des réserves souterraines.

IV.5 Les caractéristiques pédologiques et formations végétales du bassin de la Falémé

Les travaux déjà réalisés de Pereira Bareto, 1966 ; Bèye, 1964 et Baldensperger, 1965 cités par Rochette (1974) présentent les différents types de sols du bassin. Ils dépendent de la pétrochimie des

⁵⁷ Traoré, 1995) - Etude des échanges hydrogéologiques entre les eaux du lac de Guiers et la nappe alluviale superficielle sous-jacente Sénégal Mémoire de DEA en Science de l'environnement 108 p

formations du socle cristallin, mais aussi et surtout de leur évolution géomorphologique. Les formations végétales sont étroitement liées aux sols.

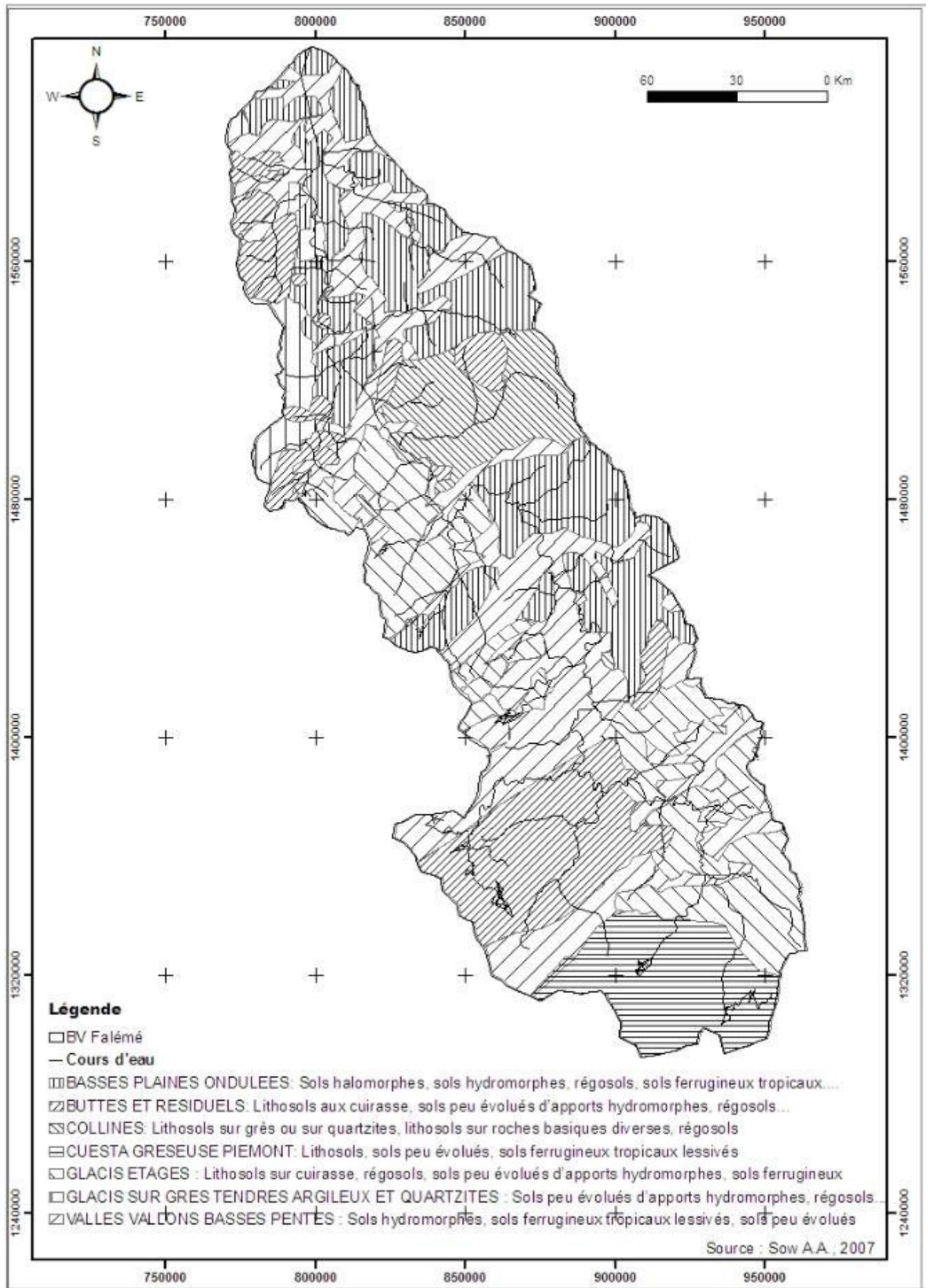
IV.5.1 Les caractéristiques pédologiques du bassin

La typologie des sols du bassin est présentée dans le **Tableau 12** suivant qui montre la prédominance des sols squelettiques (cuirasse, sols gravillonnaires et affleurements de roches, sols vertiques et de type schiste...) dans le bassin. Les types de sols associés aux paysages varient en fonction de la lithologie et de la topographie. On distingue :

Tableau 12 : Typologie des sols présents dans le bassin de la Falémé (Source Sow A.A, 2007)

Typologie	Variante et/ou caractéristiques
Sols ferrugineux tropicaux (groupe des sols lessivés)	Sols ferrugineux tropicaux sur matériaux sablo-argileux à argilo-sableux colluvio-alluvial (sur axes fluviaux)
	Sols ferrugineux tropicaux sur matériaux argilo-sableux à argileux plus ou moins limoneux des plateaux
	Sols ferrugineux tropicaux sur matériaux sablo-argileux dérivés des granites (sur la zone granitique)
	Sols ferrugineux tropicaux sur matériaux sableux à sablo-argileux dérivés des grès (au pied des massifs de grès)
Sols minéraux bruts	Sols intrazonaux sur cuirasse ferrugineuse (sur des roches diverses : grès, granites, schistes, roches vertes...)
Sols jeunes peu évolués	Sols peu évolués d'érosion, d'origine allochtone (sur matériau gravillonnaire ou riche en éléments ferrugineux)
	Sols peu évolués d'apport, issus du transport (sur matériaux sableux à sables argileux provenant du granite)
	Sols peu évolués hydromorphes (sur matériaux gravillonnaires plus ou moins limoneux-argileux (pédographie))
Vertisols à paravertisols	Sols sur roches basiques caractérisés par une richesse en argile gonflante du type montmorillonite (de couleur foncée et une structure large)
Sols bruns eutrophes tropicaux	Sols à bon drainage interne, bien structurés et plus riches en oxyde de fer, relativement imperméables (matériau provenant de roches basiques ou d'alluvions argileuses (plus hydromorphes).
Sols halomorphes	Sols très imperméables du fait de la texture, mais surtout du sodium (sur le bassin ouest)
Sols hydromorphes	Sols de bas fonds soumis à une submersion totale ou partielle, temporaire ou permanente par les eaux.

- ❖ **Sur les buttes et plateaux à sommets cuirassés** : les versants portent des sols gravillonnaires profonds bien drainés et poreux (des sols ferrallitiques remaniés), sur les sommets, dominant les sols squelettiques avec la présence de matériaux gravillonnaires reposant sur la cuirasse ferrugineuse.
- ❖ **Sur les affleurements rocheux** : la couverture pédologique est limitée à des plages isolées où les sols sont profonds, avec une texture grossière en surface et moyenne à fine en profondeur.



Carte 11 : Esquisse morpho-pédologique du bassin versant de la Falémé (Source Sow A.A. 2007)

❖ **Sur les basses croupes et glacis d'érosion ou d'épandage** : les matériaux superficiels sont essentiellement formés de gravillon ferrugineux. La proportion de terre fine est faible et présente une texture allant du sablo-limoneux au limono-sableux. On peut noter :

- le matériau généralement gravillonnaire des croupes qui repose sur une très épaisse carapace ferrugineuse contenant souvent des débris de grès ferrugineux. Au niveau des versants, les gravillons sont absents dans les matériaux de surface. Dans l'ensemble, les glacis d'épandage sont répandus surtout vers le Nord et le Nord-est du bassin, reconnaissables par leur coloration rouge ;
- l'existence de terres salées en de nombreux endroits situées dans une zone de colmatage important. L'engorgement est ici superficiel et il s'agit de sols secs de couleur variable, mais le plus souvent pâle, panachée de rouge et de jaune.

L'analyse granulométrique réalisée par Tropica Environnemental Consultants (2008)⁵⁸ à deux endroits différents du bassin (**Tableau 13**), montre des teneurs élevées en argiles qui sont de l'ordre de 63,88 % dans le barrage 1. Pour le barrage 2, elles sont beaucoup plus faibles (31,49%).

Tableau 13 : Poids volumique des éléments constitutifs du sol (Tropica Environnemental Consultants, 2008)

	Coordonnées		Poids initial		Poids sable		Poids cailloux		Poids argile	
	Latitude	Longitude	Poids en g	%	Poids en g	%	Poids en g	%	Poids en g	%
Barrage 1	13,19102	-12,12808	1277,6	100	150,58	11,78	310,9	24,33	816,14	63,88
Barrage 2	13,20301	-12,15720	1256,3	100	168	13,37	692,6	55,13	395,7	31,49
Moyenne				100		12,57		39,73		47,68

Dans le bassin versant de la Falémé, comme partout ailleurs, la pédogenèse dépend essentiellement des facteurs climatiques, topographiques et géologiques. Elle est caractérisée par une altération profonde des minéraux primaires (excepté le quartz), le lessivage de la silice et des bases notamment le calcium et le magnésium, l'accumulation des sesquioxydes de fer et d'aluminium (AGEFORE, 2004)⁵⁹.

IV.5.2 Les formations végétales du bassin

Les formations végétales sont étroitement liées aux sols (sur chaque type de sols, on trouve une végétation particulière), la fréquence et l'intensité de la submersion des terres, à leur nature, leur degré de salure, mais surtout à la distribution de la pluie.

On distingue deux types de formations dominantes du Nord au Sud du bassin : les formations de savanes qui sont surtout présentes dans la basse et moyenne Falémé et les forêts claires et riches dans la haute Falémé au Sud. Le caractère commun à ces formations reste une périodicité marquée et saisonnière de la composition ligneuse caducifoliée et herbeuse. Le **Tableau 14** donne la typologie de la

⁵⁸ Tropica Environnemental Consultants, 2008, EIES Pipeline Eaux Falémé SMC, Rapport d'audience publique dans le cadre de l'étude d'impact environnemental du projet d'installation et d'exploitation d'une conduite de pompes d'eau de la Falémé vers la mine de la Sabodala Mining Company. 176 p.

⁵⁹ AGEFORE, 2004 : Etude d'Inventaire des Ressources de la Biodiversité de l'Aire Transfrontalière du Bafing – Falémé – 2^{ème} phase Tome I Zone de Gale – Limacole. Rapport final AGEFORE, avril 2004.

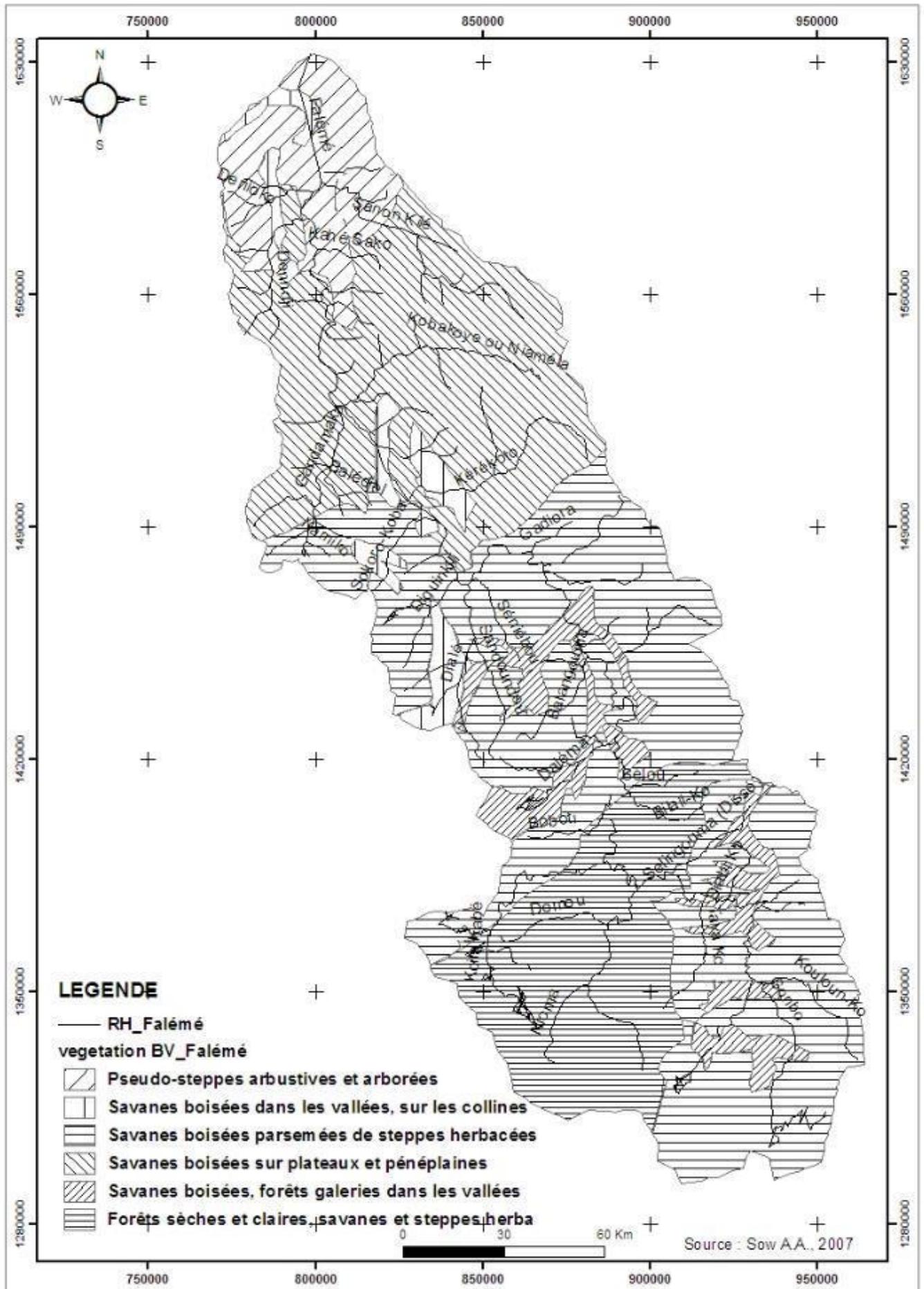
végétation et quelques espèces dominantes et la **Carte 12** une distribution des formations végétales entre les trois régions naturelles du bassin.

Les savanes se caractérisent par la présence d'une strate herbacée et des espèces ligneuses *pyrotolérantes* : *Combretum sp*, *Vitex sp*, *Ostioderich chevaleri*, *Landolphia sp*, *Nauclea sp*, etc. En fonction de l'importance du tapis herbacé et des ligneux, on distingue les savanes herbeuses, arbustives et arborées. On rencontre aussi des steppes sahéliennes ou savane arborée et boisée sur les bowé. Les forêts sèches, quant à elles, sont marquées par la faible présence ou l'absence de tapis herbacé. Elles comportent généralement une seule strate avec de nombreuses espèces de lumière.

Tableau 14 : Typologie de la végétation présente dans le bassin de la Falémé (Source AGEFORE, 2004)

Typologie		Caractéristiques et/ou zones de présence	Espèces dominantes
Savanes	Les savanes herbeuses	Aux sommets des plateaux	<i>Andropogon gayanus</i> , <i>Sorghastrum sp</i>
		Sur les pentes	<i>Hyparrhenia sp</i> , <i>Loudetia sp</i> , <i>Pterocarpus lucens</i>
	Les savanes arbustives	Association d'herbacées et de ligneux dont la hauteur ne dépasse pas 7 mètres	<i>Combretum glutinosum</i> , <i>Vitellaria paradoxa</i> , <i>Terminalia macroptera</i> , <i>Pterocarpus erinaceus</i>
	Les savanes arborées	Les espèces ligneuses dominant	<i>Parinari excelsa</i> , <i>Erythrophleum guineense</i> , <i>Parkia biglobosa</i> , <i>Isobertia doka</i> et <i>Daniellia oliveri</i>
		Au dessus de ce peuplement monotone	<i>Pterocarpus erinaceus</i> , <i>Bombax costatum</i> , <i>Tamarindus indica</i> , <i>Daniellia oliveri</i>
		Sur les terrains défrichés	<i>Khaya senegalensis</i> , <i>Adansonia digitata</i> , <i>Ceiba pentandra</i>
Les steppes sahéliennes	Sur buttes et collines résiduelles	<i>Acacia macrostachya</i> , <i>Piliostigma reticulatum</i> , <i>Andropogon</i> , <i>Pennisetum</i> , <i>Bonania choetocophala</i> .	
Forêts sèches	Les forêts claires	Elles sont de plus en plus rares et confinées dans les zones encore peu peuplées du bassin de la Falémé	<i>Antiaris africana</i> , <i>Khaya sénégalensis</i> , et <i>Diospyros mespiliformis</i> , <i>Pterocarpus erinaceus</i> , <i>Parinari excelsa</i> , <i>Detarium senegalense</i> , <i>Erythrophleum guineense</i> , <i>Daniellia oliveri</i> , <i>Vitex doniana</i> , <i>Parkia biglobosa</i> , <i>Lophira lanceolata</i> , <i>Azelia africana</i> , <i>Ceiba pentandra</i> , <i>Adansonia digitata</i> , <i>Sterculia tragacanta</i> , <i>Combretum sp</i> .
	Les galeries forestières	Situées le long de la rivière Falémé et évoluent en formations sempervirentes.	<i>Mitragyna inermis</i> , <i>Uapaca somon</i> , <i>Cola cordifolia</i> , <i>Elaeis guineensis</i> , <i>Raphia sudanica</i> , <i>Borassus flabellifer</i> , <i>Oxytenanthera abyssinica</i> .
	Les bosquets forestiers	Situés souvent autour des villages	<i>Ceiba pentandra</i> , <i>Adansonia digitata</i> , <i>Cola cordifolia</i>

La dissémination des végétaux se fait suivant la tolérance écologique respective des espèces. Les forêts galeries forment des peuplements azonaux qui contrastent avec les paysages végétaux de la Falémé (Sow A.A. 2007).



Carte 12 : Esquisse des paysages végétaux dans le bassin versant de la Falémé (Source Sow A.A. 2007)

De nombreuses espèces se mélangent à des espèces soudaniennes dans un univers de raphia (*Raphia sudanica*) qui se développent sur les zones constamment inondées. Les zones temporairement inondées des lits majeurs sont peuplées de plusieurs espèces de rôniers (*Borassus aethiopum*). On peut toutefois noter des paysages particuliers en fonction du relief et des sols :

- Sur les **plateaux cuirassés**, la végétation ligneuse très réduite aussi bien par le nombre d'espèces que par la taille, composée particulièrement de combrétacées.
- Sur les **versants à pente moyenne**, la végétation est dense et se caractérise par une grande diversité d'espèces et une belle venue des arbres, mais cette densité connaît une décroissance progressive du haut vers le bas du bassin.
- Sur les **versants à pente faible**, la végétation ligneuse, toujours assez claire, est dominée par *Combretum glufinosum*, *Acacia dudgeoni* et *Maytenus senegalensis*.
- Dans les **bas-fonds**, la dissémination de la végétation ligneuse, sa composition ainsi que sa densité dépendent des conditions d'hydromorphie et la nature des sols.
- Les **sols halomorphes** portent une savane arbustive assez dense à *Acacia seyal* avec quelques *Pterocarpus erinaceus*, *Balanites aegyptiaca* et *Combretum sp.* Après dégradation, la composition arbustive à *Acacia seyal* se transforme en bosquets avec un tapis herbacé discontinu, entrecoupé par de grandes étendues du sol à nu. Le bambou est fréquent le long des marigots.
- Les **terrains cuirassés**, souvent parsemés de gravillons et de quelques blocs de cuirasse, sont complètement dénudés en saison sèche. Ce n'est qu'en saison des pluies que ces surfaces rocailleuses se couvrent de graminées, riches en individus mais pauvres en espèces.

Conclusion partielle

La présentation des facteurs stables du bassin (géologie et hydrogéologie, géomorphologie, pédologie et végétation) permet de comprendre les causes des variations des régimes hydrologiques et la genèse des crues. Jusqu'à présent, notre démarche, purement géographique, a permis à travers ces facteurs d'entrevoir les caractéristiques du milieu naturel du bassin. Certes, ces différents facteurs, par leur nature et leur évolution, sont très liés et concordent tous du point de vue hydrologique par une partition du bassin en trois ensembles distincts : le cours supérieur, le cours moyen et le cours inférieur. Mais, par leurs nuances qui peuvent être locales ou régionales, tout en agissant de façon simultanée, ils peuvent aussi se particulariser sur l'écoulement. Toutefois, cet écoulement est lié à la pluie et à sa variabilité.

L'analyse des éléments du climat et de leur variabilité est précédée de la présentation des mécanismes généraux du climat. Le climat prédétermine et conditionne l'écoulement à travers l'abondance et la répartition saisonnière des pluies. Aussi réservons-nous une part importante aux régimes pluviométriques.

V.1 Les mécanismes généraux du climat

Ils sont étudiés à travers la circulation atmosphérique générale et les flux qu'ils génèrent. Le climat du bassin de la Falémé régi par les mécanismes aérologiques (**Carte 13**), est fonction des centres d'action situés de part et d'autre de l'Equateur géographique. Ils émettent des flux qui se rencontrent pour former une discontinuité appelé Equateur météorologique dont la migration, de part et d'autre des deux hémisphères, détermine les types de saisons (Leroux, 2000). Le flux et reflux de l'Equateur météorologique déterminent le type de climat sur la zone Ouest africaine (Sagna, 2006).

V.1.1 Les centres d'action

La circulation atmosphérique générale au Sénégal, comme dans l'ensemble des pays de l'Afrique de l'Ouest, est organisée, généralement, par le dynamisme de trois centres d'action : l'anticyclone des Açores, de Sainte Hélène et Saharo-libyen.

❖ L'anticyclone des Açores

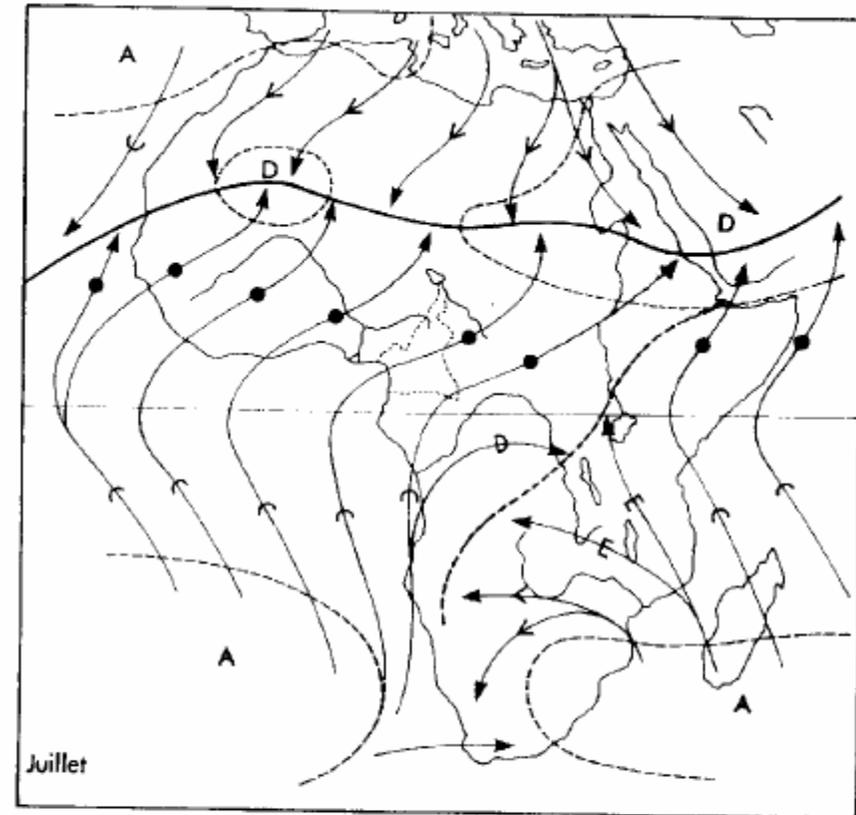
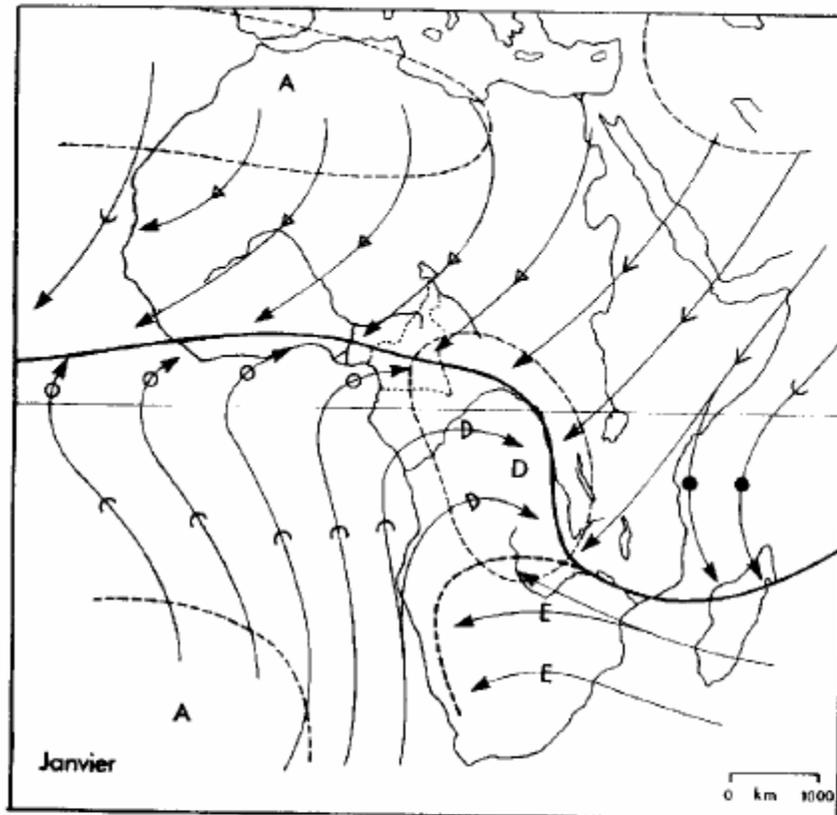
Centré dans l'hémisphère nord, il est permanent et se manifeste durant l'hiver de l'Hémisphère Nord dans la zone du bassin de la Falémé. Durant cette saison, l'essentiel de la circulation est décalé vers l'hémisphère météorologique sud. Les flux circulent de la zone anticyclonique nord vers la zone dépressionnaire sud. De ce fait, le flux d'alizé issu des Açores se manifeste sur toute la zone du bassin de la Falémé.

❖ L'anticyclone de Sainte-Hélène

Il se trouve dans l'hémisphère Sud, et est aussi permanent. Il génère un flux d'alizé au départ de l'anticyclone de Sainte-Hélène qui traverse l'Equateur géographique, change de direction sous l'impulsion de la force de Coriolis, devient mousson dans l'hémisphère Nord.

❖ L'anticyclone Saharo-libyen

Il est saisonnier, n'étant présent qu'en hiver de l'hémisphère nord. En Eté, il est remplacé au sol par une dépression : c'est la dépression saharienne qui attire le flux de mousson issu de Sainte-Hélène. Son influence est plus directe dans le bassin du fait qu'il est continental. Sa manifestation dans la zone se fait durant toute l'année ; tantôt en anticyclone soutenant l'activité de l'anticyclone des Açores, tantôt en dépression appuyant le rôle de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Il génère des flux d'alizé continental (harmattan).

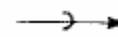
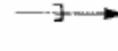
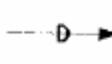


Centres d'action

Flux

Discontinuités

-  ANTICYCLONE
-  DEPRESSION

-  ALIZE MARITIME
-  ALIZE CONTINENTAL
-  ALIZE CONTINENTAL: HARMATTAN
-  ALIZE MARITIME CONTINENTALISE
-  MOUSSON S.S.
-  MOUSSON S.L.
-  PSEUDO-MOUSSON

-  CONVERGENCE INTERTROPICALE (C.I.T.) ou FRONT INTERTROPICAL (F.I.T.)
-  CONVERGENCE INTEROCEANIQUE AFRICAINE (C.I.O.A.)

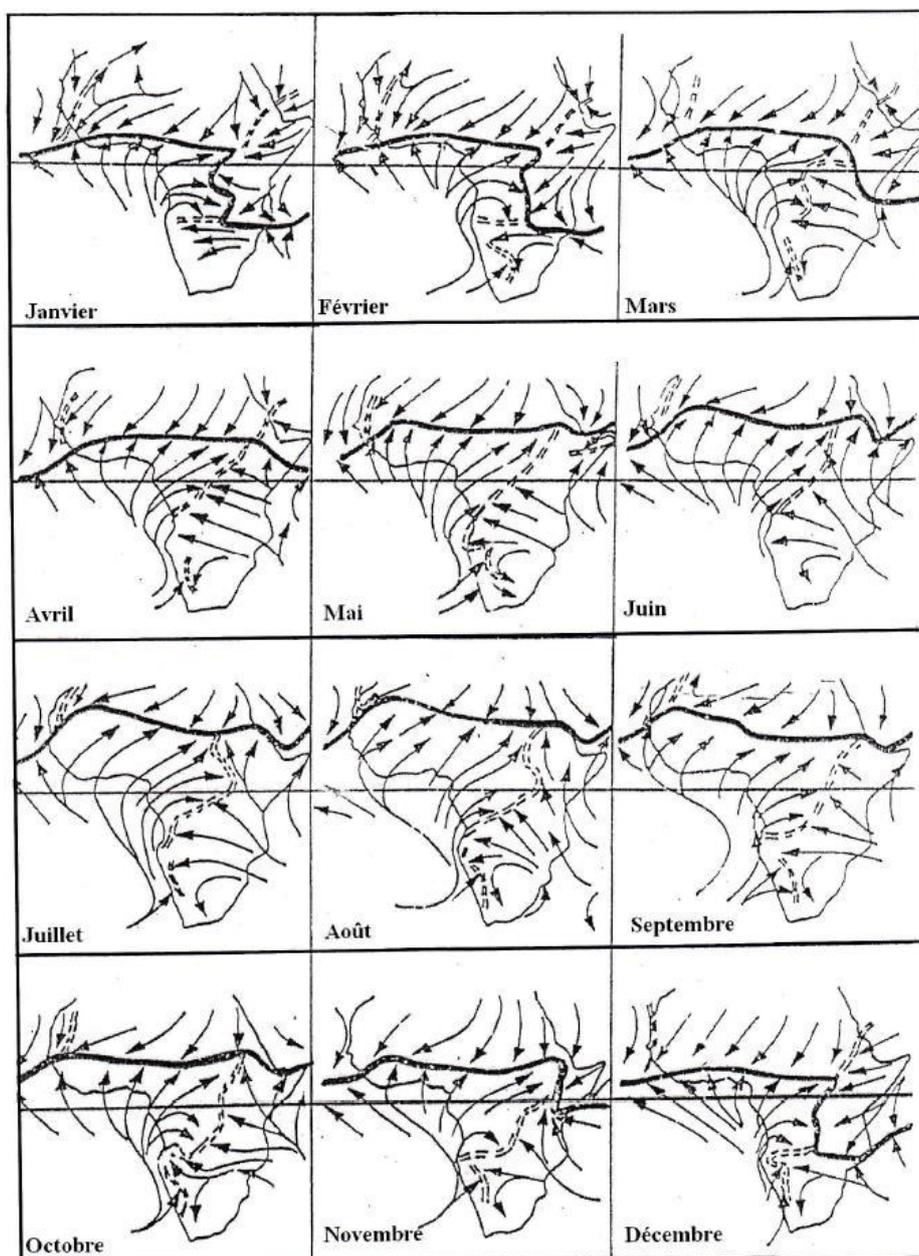
Carte 13 : Dynamique de la circulation atmosphérique en Afrique (M. Leroux, 1980, 1992, 1993)

Le bassin de la Falémé, par sa situation continentale, 12°11' et 14°27' de latitude N et 11°12' et 12°15' de longitude O, ne connaît pratiquement que les influences des anticyclones de Sainte-Hélène et Saharo-libyen. Le flux d'alizé issu de l'anticyclone des Açores situé dans l'Atlantique nord l'intéresse rarement.

Dans leur dynamisme annuel, le rapport de forces entre l'anticyclone Saharo-libyen et celui de Sainte-Hélène détermine le type de saison dans la zone du bassin de la Falémé. La rencontre entre les flux d'alizé et de mousson donne une discontinuité, l'Equateur météorologique, dont la position et la migration déterminent le type de saison.

V.1.2 Les flux et discontinuités

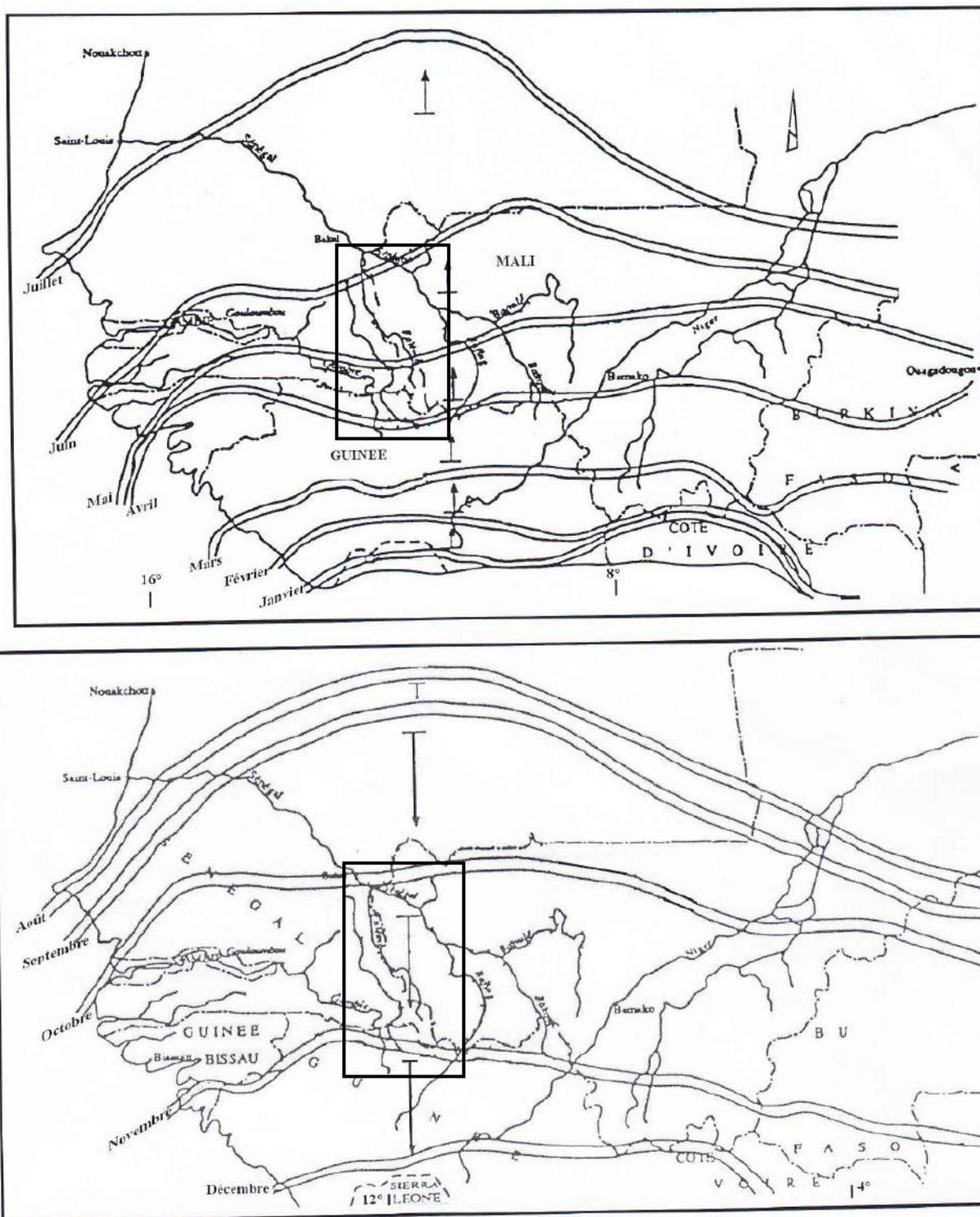
Les flux se différencient par leurs origines et leurs parcours qui déterminent leurs caractéristiques. Deux types de flux intéressent le bassin : l'alizé continental (harmattan) et la mousson.



Carte 14: Position moyenne de la trace au sol de l'Equateur météorologique dans sa structure FIT (Leroux M. 1980)

L'alizé continental ou harmattan provient de l'anticyclone Saharo-libyen et se manifeste durant les mois de la saison non pluvieuse. Ce vent correspond selon Dione O. (1996) aux directions N, NE, E, NO et enregistre des fréquences significatives entre novembre et avril. C'est un vent chaud et sec avec un pouvoir évaporant élevé (Carte 14).

La mousson provient de l'anticyclone de Sainte Hélène, c'est un vent chaud et humide, vecteur d'humidité précipitable. Elle correspond aux directions S, SW, W, NW et présente de fortes fréquences durant les mois de mai à octobre (Dione O., 1996).



Carte 15 : Migration de la trace au sol de l'Equateur météorologique en Afrique Occidentale (Leroux M., 1980)

L'Equateur Météorologique, la principale discontinuité qui intéresse le bassin, est la zone de convergence intertropicale qui sépare les flux d'alizés du Nord et la mousson du Sud. Sa trace au sol est appelée front intertropical (FIT).

Les migrations du FIT, fonction du dynamisme des deux hémisphères météorologiques, déterminent les saisons avec la zone pluvieuse au Sud de la trace au sol du FIT et la zone non pluvieuse au Nord de celle-ci.

V.1.3 La trace au sol de l'Equateur Météorologique

Deux zones dépendent de la position de la trace au sol de l'EM : la zone non pluvieuse et la zone pluvieuse.

V.1.3.1 La zone non pluvieuse

Elle se trouve au Nord de la trace au sol de l'Equateur Météorologique et reste dominée par le flux venant du Nord, notamment de l'anticyclone saisonnier Saharo-libyen. Dans le bassin, il s'agit de l'alizé continental (harmattan. L'harmattan, vent chaud et sec, domine la circulation durant toute la période et impose ses caractéristiques hygrométriques et thermiques (faible humidité relative, fortes températures) à la zone. Durant cette période, les pluies sont rares voire inexistantes, de faibles pluies (appelées "Heug") peuvent intervenir et sont dues aux incursions d'air polaire dans le domaine tropical. Ces pluies peuvent favoriser l'écoulement en augmentant l'humidité relative et en diminuant l'évaporation.

V.1.3.2 La zone pluvieuse

Elle se trouve au Sud de la trace au sol de l'Equateur Météorologique, dont la présence annonce l'installation du flux de mousson. Dans le bassin de la Falémé, la saison pluvieuse s'installe d'abord dans les zones les plus au Sud et progresse vers le Nord. Ces précipitations estivales sont dominées par les pluies de lignes de grains, des perturbations pluvio-orageuses d'intensité forte et de durée relativement faible.

La partie méridionale du bassin de la Falémé est la première, mais aussi la dernière à voir la trace au sol de l'Equateur Météorologique dans sa structure FIT (**Carte 15**) :

- Dans son mouvement de montée vers le Nord ;
- Et lors de son repli vers le Sud.

Ce mouvement détermine la durée et la quantité de pluie reçue, c'est-à-dire les régimes pluviométriques.

V.2 Les régimes pluviométriques dans le bassin

Les régimes pluviométriques dépendent de la quantité de pluie reçue (total annuel) et de la durée de la saison pluvieuse. La pluie étant par ailleurs le principal facteur de délimitation des domaines climatiques en zone tropicale, Sow A.A. (2007), associant la latitude et la hauteur de pluie reçue, a défini les quatre domaines climatiques du bassin de la Falémé. Il s'agit :

- du domaine guinéen par ses hauteurs de pluies situées entre 1500 et 2000 mm ;
- du domaine sud soudanien avec des pluies entre 1000 et 1500 mm ;
- du domaine nord soudanien où les pluies se situent entre 500 et 1000 mm ;
- du domaine sahélien pour des pluies entre 100 et 500 mm.

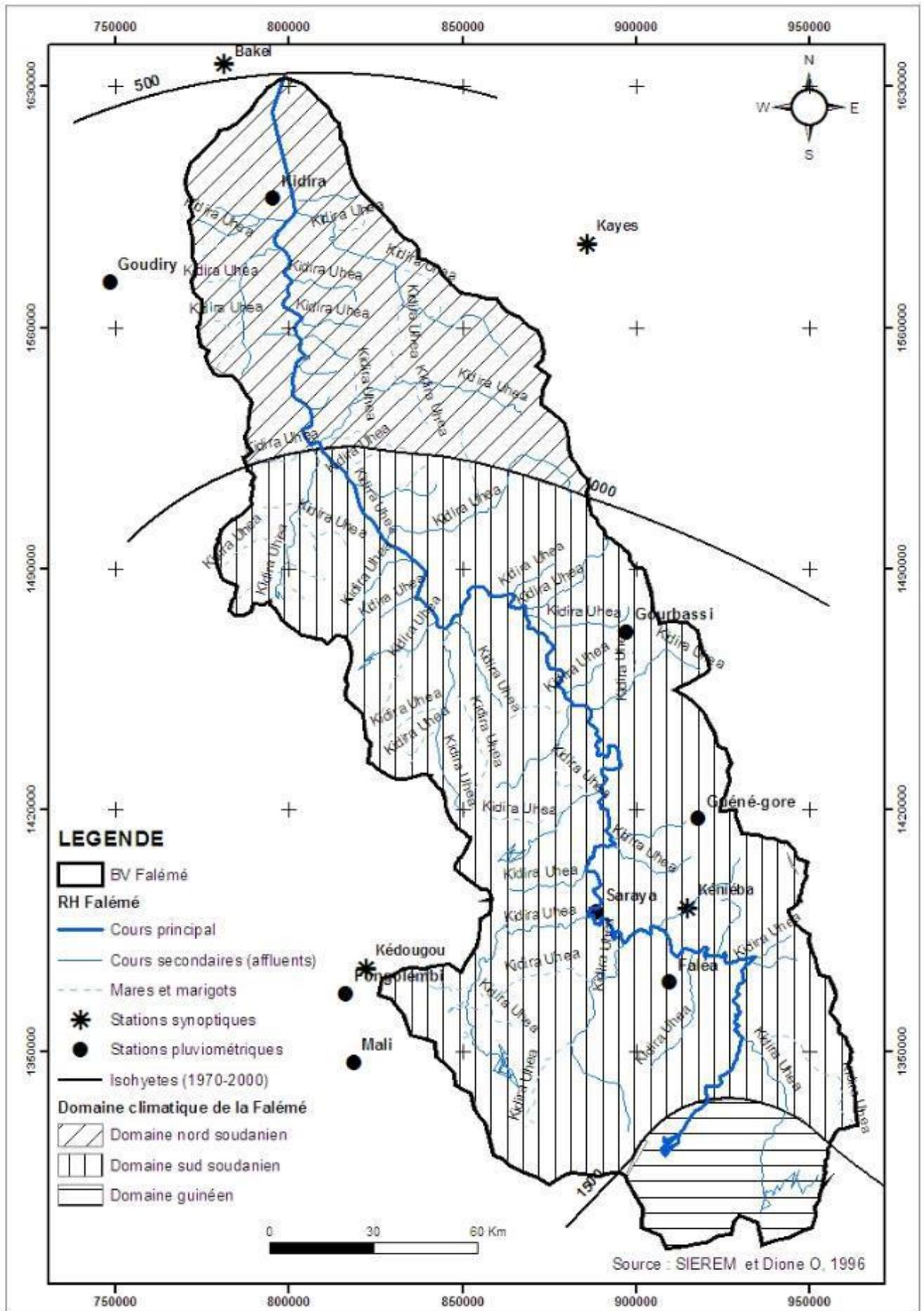
La Carte 16 présente les trois domaines climatiques. Cependant, le domaine sahélien n'intéresse pas vraiment le bassin de la Falémé.

Tableau 15 : Situation des domaines climatiques au Sénégal et de leurs caractéristiques

Domaines pluviométriques		Latitude N	Longitude O	Saison pluvieuse												Hauteur de pluies annuelle entre	Bassin
Domaines	Stations de base			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
Guinéen	Labé	10°22 12°23	12°40 11°07													1500-2000	Haut bassin Falémé
Sud soudanien	Kédougou	12°16 13°19	14°06 11°01													1000-1500	Cours moyen Falémé
Nord soudanien	Tambacounda	13°08 14°28	16°04 11°04													500 -1000	Cours inférieur Falémé
Sahélien	Bakel	14°53 15°23	15°07 11°14													100-500	Nord Cours inférieur Falémé

Le Tableau 15 présente les régimes pluviométriques du bassin, leur extension dans le bassin, la durée et le total pluviométrique correspondants.

Sur les trois régimes pluviométriques du bassin, une importante variabilité de la pluie est notée. Cette dernière est analysée aux échelles mensuelles, journalières et annuelles.



Carte 16 : Domaines climatiques du bassin versant de la Falémé

V.2.1 La variabilité mensuelle de la pluie dans le bassin

La variabilité mensuelle de la pluie est étudiée aux trois régimes pluviométriques du bassin.

V.2.1.1 Le régime pluviométrique guinéen

Dans le bassin, le régime guinéen correspond aux stations situées entre 10°22' et 12°23' de latitude Nord. Il est analysé à la station de Labé à 11° 19' de latitude Nord et 12° 18' de longitude Ouest et à une altitude de 1025 m (Tableau 16).

Tableau 16 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Labé 11°19'N 12°18'O, altitude 1025 m de 1933 à 2004

Descripteurs	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Observation manquantes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Moyenne	2	2,8	9,4	42,7	143	242	324	362	292	161	38,7	7	1612	129
Ecart-type	5,2	7	19,9	38,6	60,9	62,2	86	82,1	78,6	76,9	45,8	18,4	261	19
Coefficient de variation	2,6	2,5	2,1	0,9	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,5	1,2	2,6	0,2	0,1
Maximum de la série (1958)	29	34,6	115	177	281	373	591	573	527	430	246	108	2159	168
Minimum de la série (1996)	0	0	0	0	12	93	147	208	126	37,5	0	0	629	74
Ecart mm	29	34,6	115	177	269	280	444	366	401	393	246	108	1531	94
coefficient pluviométrique en %	0,12	0,17	0,58	2,65	8,88	15	20,1	22,5	18,1	9,99	2,4	0,43	100	
Début saison pluvieuse en %			54,8	45,2									100	
Maximum saison pluvieuse en %						4	23,5	51	21,5				100	
Fin saison pluvieuse en %										6,8	93,2		100	

Coefficient de variation : écart type de la série/moyenne ; Ecart en mm : différence entre les maximum et les minimum de la série observée ; Coefficient pluviométrique en% : pluie moyenne mensuelle/pluie moyenne annuelle*100.

Les postes pluviométriques de Mali et de Tougué sont associées à l'analyse. Les données analysées, pour l'essentiel empruntées à Sow A.A (2007), sont complétées sur la période allant de 2000 à 2008.

A la station de Labé, le total pluviométrique moyen annuel enregistré est de 1612 mm durant la période 1933-2004.

La saison des pluies débute normalement en mars avec 54,8 % et se poursuit jusqu'en novembre (fin de la saison) avec 93,2% des fréquences. La saison peut débuter en avril (45,2 % des fréquences).

Le maximum de la saison pluvieuse est noté au mois d'août avec 362 mm, soit 51% des fréquences suivi des mois de juillet : 23,5% et septembre : 21,5%. L'essentiel des précipitations se concentrent durant la saison pluvieuse entre juin et octobre pour 85,7% du total pluviométrique annuel. Le nombre de jours de pluies est important, il est égal à 129 jours/an. La pluie est variable dans ce régime.

L'année la plus humide de la série est l'année 1958 qui a reçu 2159 mm en 168 jours de pluie et la plus sèche est 1984 avec 1228 mm, l'écart étant de 931 mm.

La pluie est caractérisée par une forte variabilité mensuelle avec des coefficients de variation supérieurs ou égaux à 0,2. Les mois les plus pluvieux ont la variabilité la plus faible : CV = 0.2 en août, 0.3 en juin, juillet et septembre.

Le régime pluviométrique guinéen intéresse la zone du haut bassin de la Falémé. Il se caractérise par l'importance des précipitations (plus de 1500 mm/an) et la saison des pluies dure 8 à 9 mois.

Les stations de Tougué et de Mali (Tableau 17 et Tableau 18), associées à l'analyse, confirment l'évolution de la pluie en régime guinéen.

Aux stations de Tougué et de Mali, la pluie débute en mars (principalement en avril) et se termine en novembre, elle dure ainsi huit mois à neuf mois. Comme à Labé, le mois d'août reste le mois du maximum pluviométrique avec 56,2%, suivi des mois de juillet (31,2%) et de septembre (11%).

Tableau 17 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Tougué : 11°26'N 11°40'O altitude 868m de 1922 à 2000

Descripteurs	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	55
Observations manquantes	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	24
Moyenne	2,2	1,2	7,3	30,2	97,6	183	320	411	293	145	29,8	8,5	1530	84,7
Ecart type	7,2	5,4	19,7	25,7	58,8	75	114	129	88	58,7	39,6	30,8	290	18,4
Coefficient de variation	3,2	4,5	2,6	0,8	0,6	0,4	0,35	0,31	0,3	0,4	1,32	3,6	0,19	0,2
Maximum de la série	36	41	112	91	238	443	648	755	456	319	210	207	2228	128
Minimum de la série	0	0	0	0	0	54,3	90	188	136	58	0	0	1021	43
Ecart mm	36	41	112	91	238	389	558	567	320	261	210	207	1207	85
coefficient pluviométrique en %	0,14	0,08	0,5	2	6,4	12	21	26,9	19	9,4	2	0,6	100	
Début saison pluvieuse en %			34,4	54,7	10,9								100	
Maximum saison pluvieuse en %						1,6	31,2	56,2	11				100	
Fin saison pluvieuse en %										25,0	75,0		100	

Tout comme la station de Labé, la pluie est ici aussi caractérisée par une forte variabilité mensuelle. Les coefficients de variation (CV) sont relativement faibles pour les mois les plus pluvieux de la série comme juillet, août et septembre, et élevés pour les mois de faibles pluies.

Tableau 18 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Mali 12°08'N 12°18'O Altitude 1464m de 1922 à 2000

Descripteurs	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Nombre d'observations	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Observation manquantes	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Moyenne	0,3	0,8	4,7	18,5	86,3	229	349	471	364	171	23	0,9	1706
Ecart-type	1,6	1,3	12	21,4	54,6	71,6	107	88,3	119	91	39	2,3	50,7
Coefficient de variation	5,3	1,6	2,5	1,1	0,6	0,3	0,3	0,2	0,3	0,5	1,6	2,5	1,4
Maximum de la série 1993	13	7	66	79	289	376	612	658	654	388	240	14	2287
Minimum de la série 1964	0	0	0	0	0	65	124	204	130	38	0	0	1030
Ecart mm	13	7	66	79	289	311	488	454	524	350	240	14	1257
coefficient pluviométrique en %	0	0	0,3	2	5	13,4	20,5	27,6	21,3	10	1,3	0	100
Début saison pluvieuse en %			25,0	58,8	14,7	1,5							100
Maximum saison pluvieuse en %							9	68,6	22,4				100
Fin saison pluvieuse en %										32,4	67,6		100

Les caractéristiques communes du régime guinéen sont :

- La durée de la saison pluvieuse qui est partout de huit mois en moyenne mais pouvant atteindre certaines années neuf mois : elle commence en avril et se termine en novembre ;

- La quantité de pluie totale annuelle ou total pluviométrique annuel supérieur à 1500 mm/an ;
- Le maximum pluviométrique qui se situe toujours au mois d'août.

Le régime guinéen est de type tropical et unimodal.

En régime guinéen, la saison des pluies dure huit mois en moyenne (avril à novembre) avec comme début normal de la saison des pluies, le mois d'avril et comme fin normale, le mois de novembre. C'est un régime stable car le maximum pluviométrique mensuel se situe le plus fréquemment au mois d'août avec des pourcentages supérieures à 50%.

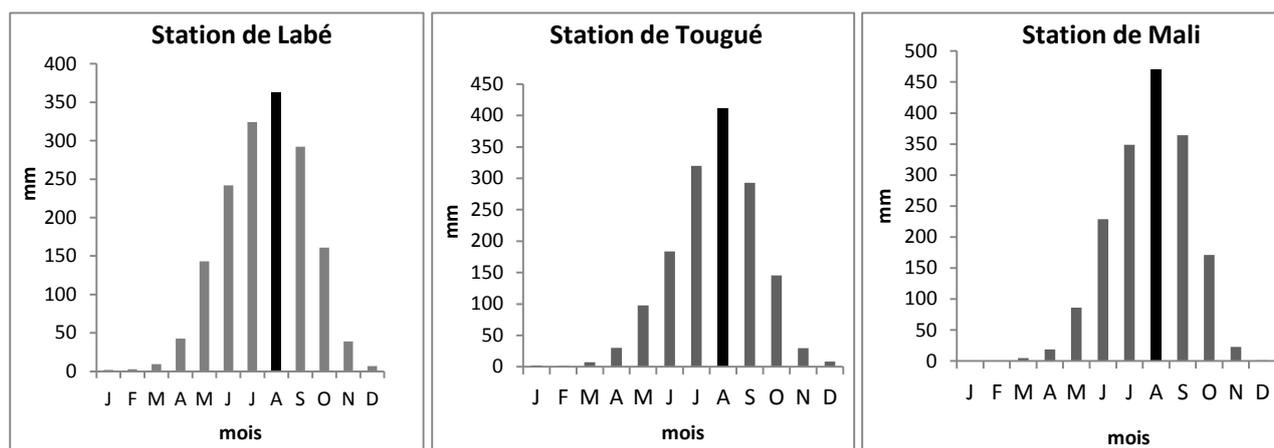


Figure 10 : Evolution mensuelle de la pluie dans le régime pluviométrique guinéen (1950-2004)

V.2.1.2 Le régime sud soudanien

Le régime sud soudanien est analysé à la station de Kédougou qui se trouve à 12° 34' de latitude Nord et 12° 13' de longitude Ouest pour une altitude de 178 m (Tableau 19), relativement moins élevée comparée au domaine guinéen.

Tableau 19 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kédougou 12°34' N 12°13'O Altitude 178m de 1950 à 2008

Kédougou (1950-2008)	1950	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	2007	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Observation manquantes		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Moyenne		0,22	0,3	0,86	3,96	52	167	271	330	287	114	8,39	0,39	1230	83
Ecart-type		1,26	1,01	4,76	8,63	62,8	62	81,9	107	86,7	86,4	17,1	1,32	264	
Coefficient de variation		5,83	3,32	5,53	2,18	1,21	0,37	0,3	0,32	0,3	0,76	2,04	3,33	0,21	
Maximum de la série		9,7	5,6	36,7	42,7	409	337	611	606	543	418	96,6	58	2160	75
Minimum de la série	1954	0	0	0	0	0	67,4	150	48,8	128	23,2	0	0	806	73
Ecart mm	1990	9,7	5,6	36,7	42,7	409	270	461	557	415	395	96,6	58	-806	2
coefficient pluviométrique en %		0	0	0	0,3	4,2	13,6	22	27	23,3	9,2	0,9	0	100	
Début saison pluvieuse en %					44,1	54,2	1,7							100	
Maximum saison pluvieuse en %							1,7	15,5	57	25,8				100	
Fin saison pluvieuse en %											67,8	32,2		100	

A la station de Kédougou (Figure 11), la saison des pluies commence en mai (début normal : 54,2 %) et se termine en octobre (pour 67,8 % des cas). Cependant, la fin peut être tardive au mois de novembre

avec 32,2 % des situations. Le maximum pluviométrique intervient au mois d'août avec 57% des fréquences suivi des mois de septembre : 25,8 % et de juillet : 15,5 %. La moyenne pluviométrique annuelle est de 1230 mm pour 83 jours de pluies. Le maximum de la série est enregistré en 1954 avec 2160 mm en 114 jours de pluies et le minimum en 1990 avec 805,5 mm en 57 jours de pluies, ce qui fait un écart de 1355 mm pour les précipitations et 57 pour le nombre de jours de pluies.

Les coefficients de variation et pluviométriques montrent la grande variabilité mensuelle de la pluviométrie.

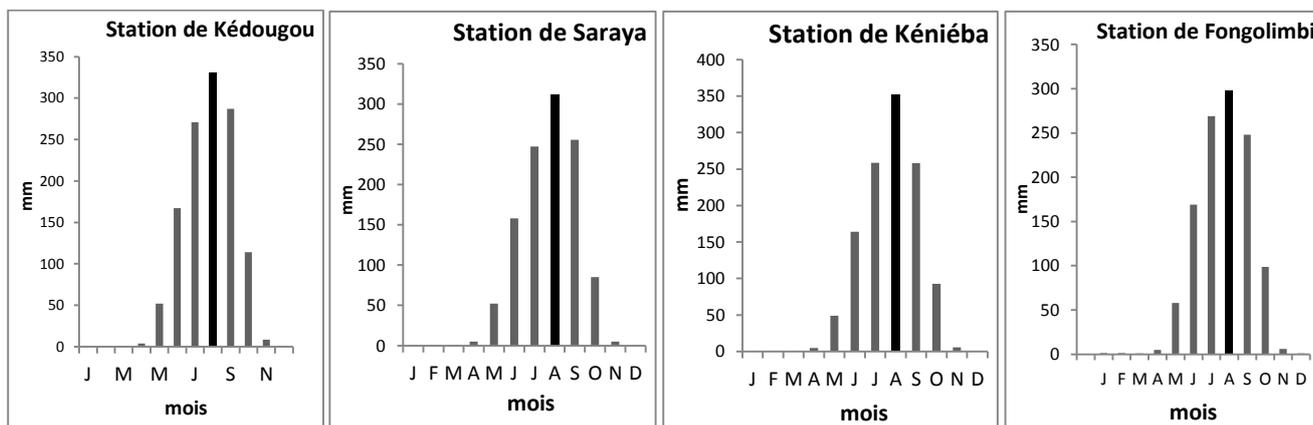


Figure 11 : Evolution mensuelle de la pluie dans le régime pluviométrique sud soudanien (1950-2008)

Comme pour les stations du domaine guinéen, le coefficient de variation est faible pour les mois pluvieux comme juin (0,3), juillet (0,3), août (0,3), septembre (0,2) et octobre (0,7). En revanche, il est très élevé pour les mois de faible pluviométrie comme janvier avec 6,4. Cette analyse nous permet d'affirmer avec Sow A.A. (2007) que la variabilité est fortement corrélée au total pluviométrique : "*plus c'est pluvieux, moins c'est variable*". Le coefficient pluviométrique révèle une forte concentration des pluies entre le mois de mai et le mois d'octobre qui enregistrent plus de 99% des totaux pluviométriques. Les stations de Saraya (Tableau 20), Fongolimbi (Tableau 21) et Kéniéba (Tableau 22) ont une évolution similaire. La saison des pluies y dure 7 mois à huit mois en moyenne (d'avril à novembre) et le maximum intervient en août. Les débuts d'hivernage précoces sont observés en avril et les fins tardives en novembre. La pluie mensuelle est variable avec des CV partout presque supérieurs à 0.20.

Tableau 20 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Saraya 12°47' 11°47' Altitude 396m de 1950 à 2000

Saraya	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	50	51	51	51	51	50	50	50	49	50	51	51	50	
Observation manquantes	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	0	0	1	
Moyenne	0,04	0,06	0,31	5,17	52,2	158	247	312	256	85,1	4,94	0,18	1120	64
Ecart-type	0,28	0,3	1,94	18,4	47,5	60,8	113	116	93	65,2	9,14	0,82	299	12
Coefficient de variation	6,47	4,82	6,18	3,55	0,91	0,39	0,46	0,37	0,36	0,77	1,85	4,63	0,27	0,19
Maximum de la série	2	1,8	14	130	220	339	907	581	580	379	45,6	5,2	2183	94
Minimum de la série	0	0	0	0	0	0	0	112	118	1,1	0	0	622	33
Ecart mm	2	1,8	14	130	220	339	907	469	462	378	45,6	5,2	1561	61
coefficient pluviométrique en %	0	0	0	0,5	4,7	14	22,1	27,8	22,8	7,6	0,5	0	100	
Début saison pluvieuse en %				41,2	51,0	7,8								100
Maximum saison pluvieuse en %							18,8	56,3	25					100
Fin saison pluvieuse en %										51,0	49,0			100

Tableau 21 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Fongolimbi 12°25 12°01 Altitude 396m de 1963 à 2006

Fongolimbi	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Observation manquantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moyenne	1,3	1,2	1	4,9	58	169	269	298	248	98,6	6	1	1147	74
Ecart-type	2	1,9	0,3	9	46	52	124	90	87,7	59	11,5	0,6	203	7,8
Coefficient de variation	1,5	1,5	0,3	1,8	0,7	0,3	0,4	0,3	0,3	0,5	1,9	0,6	0,1	0,1
Maximum de la série	14,5	13	2,1	49	179	294	968	482	527	320	54	4,1	1732	87
Minimum de la série	0	0	0	0	0	96	128	161	69	19,6	0	0	868	55
Ecart mm	14,5	13	2,1	49	179	198	840	321	458	300	54	4	864	32
coefficient pluviométrique en %	0	0,1	0,1	0,4	5	14,7	23	26	21,6	8,6	0,5	0	100	
Début saison pluvieuse en %				39,5	58,1	2,3							100	
Maximum saison pluvieuse en %							25	54,5	20,5				100	
Fin saison pluvieuse en %										65,1	34,9		100	

Tableau 22. Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kéniéba 12°48 N 11°21 0 Altitude 136 m de 1950 à 2002

Kéniéba	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	51	51	51	52	52	52	52	52	52	52	49	49	52	
Observation manquantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Moyenne	0,09	0,2	0,98	4,6	48,9	164	259	352	258	92,6	5,63	0,36	1186	
Ecart-type	0,52	0,99	3,41	7,3	33,9	60,6	79,9	131	95,7	79,6	10,2	1,62	263	
Coefficient de variation	0,17	0,20	0,29	0,63	1,44	2,71	3,24	2,68	2,7	1,16	0,55	0,22	4,51	
Maximum de la série	3,7	6,3	19,6	32,6	165	300	446	732	501	509	49,9	10,4	1914	
Minimum de la série	0	0	0	0	0	54,4	137	171	94,8	2,8	0	0	255	
Ecart mm	3,7	6,3	19,6	32,6	165	246	309	561	406	506	49,9	10,4	710	
coefficient pluviométrique en %	0,01	0,02	0,08	0,41	4,18	13,9	22,1	30,1	22	7,81	0,48	0,03	100	
Début saison pluvieuse en %				44,2	53,8	1,9							100	
Maximum saison pluvieuse en %							23,5	64,7	11,8				100	
Fin saison pluvieuse en %									7,7	73,1	19,2		100	

Dans le régime sud soudanien, on peut noter les caractéristiques suivantes :

- La durée normale de la saison pluvieuse est de sept à huit mois : d'avril à novembre. Mais, elle peut aussi durer six mois (de mai à octobre) dans le bassin de la Falémé.
- La moyenne annuelle est partout supérieure à 1000 mm/an et le maximum est en août dans plus de 50% des cas.
- Les mois pluvieux concentrent plus de 90% du total annuel et le nombre de jours de pluie annuel est inférieur à 80.
- Le coefficient de variation révèle une forte variabilité des précipitations due « à l'arrivée du flux de mousson et à son retrait rapide accompagnant le Front Intertropical » (Sow A.A, 2007).

Le régime sud soudanien est de type tropical et unimodal.

V.2.1.3 Le régime nord soudanien

Le régime pluviométrique nord soudanien est analysé à la station de Tambacounda à 13°46' de latitude Nord et à 13°41' de longitude Ouest à une altitude de 49 m. Nous lui associons les stations de Bakel (Tableau 24) et Kidira (Tableau 25) au Sénégal et Gourbassi (Tableau 26) et Kayes (Tableau 27) au Mali. Les totaux annuels de pluie ici se situent entre 500 et 1000 mm/an.

Tableau 23 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Tambacounda 13°43 N 13°41 O Altitude 49 m de 1950 à 2007

Tambacounda 1950-2007	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Nombres d'observations	58	58	58	58	58	58	58	58	57	56	58	58	58
Nombres d'observations manquantes	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0
Moyennes	0,03	0,82	0,69	5,53	27,3	98,7	195	231	185	66,8	1,95	0,32	808
Ecart-type	0,11	3,39	2,89	27	53,2	63,1	81,9	100	89,4	49,7	4,62	1,23	209
Coefficients variations	3,66	4,13	4,19	4,88	1,95	0,64	0,42	0,43	0,48	0,74	2,37	3,84	0,26
Maximum de la série	0,7	23,8	17	199	298	436	599	458	441	207	26,5	6,3	1316
Minimum de la série	0	0	0	0	0	20,6	56,8	54,2	55	0,2	0	0	434
Ecart	0,7	23,8	17	199	298	415	542	404	386	207	26,5	6,3	882
Coefficients pluviométriques en %	0	0,1	0,09	0,69	3,39	12,2	24,2	28,6	23	8,27	0,24	0,04	100
Débuts saisons pluvieuses en %				12,3	70,2	17,5							100
Maximum saisons pluvieuses en %						2	31	48	19				100
Fin saisons pluvieuses en %										57,9	42,1		100

A la station de Tambacounda (Figure 12), le total pluviométrique annuel enregistré est de 808 mm durant la période 1950-2007. La saison des pluies débute normalement en mai pour 70,2 % des cas et se poursuit jusqu'en octobre (57,9 % des figures).

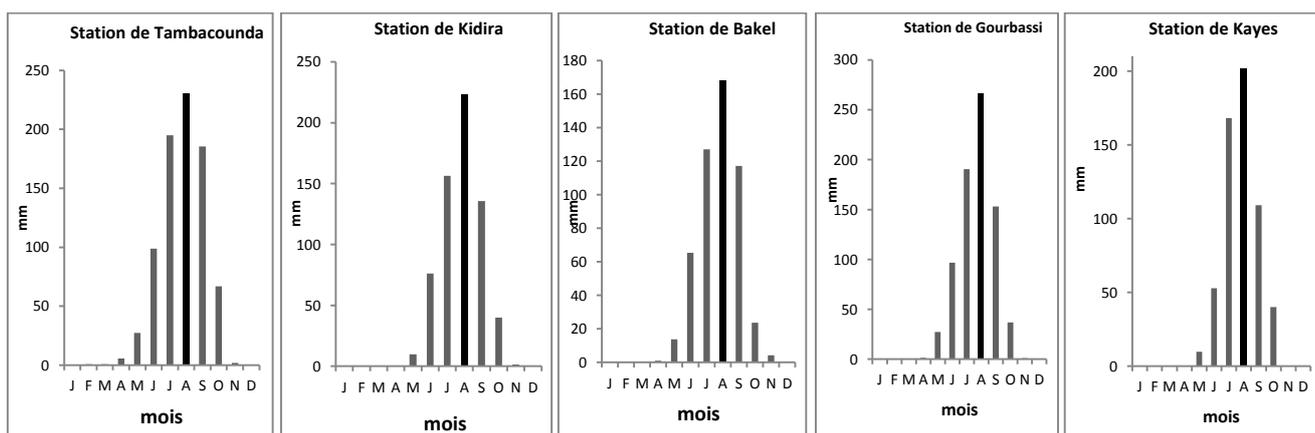


Figure 12 : Evolution mensuelle de la pluie dans le régime pluviométrique nord soudanien (1950-2008)

Le maximum de la saison pluvieuse est noté au mois d'août avec 231 mm, soit 48 % des fréquences, suivi des mois de juillet (31 %) et septembre (19 %). L'essentiel des pluies se concentrent entre juin et octobre qui totalisent 95% du total pluviométrique.

La pluie à cette station est caractérisée par une forte variabilité mensuelle : les coefficients de variation sont plus faibles pour les mois les plus pluvieux de la série comme juillet, août et septembre (entre 0,42 et 0,60), ce qui est élevé.

Les coefficients pluviométriques montrent la forte concentration de la pluie entre juin et octobre. La saison pluvieuse dure 6 mois dans ce régime avec le maximum situé en août comme partout.

Tableau 24 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Bakel 14°54 N 12°28 O Altitude 25 m de 1950 à 2008

Bakel 1950-2008	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Nombres d'observations	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	58
Nombres d'observations manquantes	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Moyenne	0,38	0,28	0,46	0,94	13,7	65,4	127	168	117	23,6	4,19	0,38	521
Ecart-type	1,9	1,52	2,67	4,67	23,7	63,8	64,2	74,3	85,6	29,3	11,8	1,26	137
Coefficient de variation	5,07	5,4	5,8	4,95	1,73	0,97	0,51	0,44	0,73	1,24	2,82	3,31	0,26
Maximum de la série	10,2	11	19,7	33,8	98,8	331	385	393	358	117	54,2	6,5	900
Minimum de la série	0	0	0	0	0	0	12	33,3	0	0	0	0	259
Ecart	10,2	11	19,7	33,8	98,8	331	373	360	358	117	54,2	6,5	641
Coefficients pluviométriques en %	0,41	0,4	0,51	0,74	4	13,8	24,9	29,6	20,2	3,9	1,2	0,37	100
Débuts saisons pluvieuses en %					70,9	27,3	1,8						100
Maximum saisons pluvieuses en %							23,2	44,6	32,1				100
Fin saisons pluvieuses en %									1,8	80,0	18,2		100

A la station de Bakel (Tableau 24), l'année pluvieuse va de mai (70,9 % des figures) à octobre (80 % des figures), le maximum d'août concentre 29,6 % du total annuel. A la station de Kidira, les mêmes observations que celles de la station de Bakel sont notées : début normal en mai (51,8 % des figures), suivi de juin (46,4 %) et leur fin normale en octobre avec 71,4 %. Le maximum se trouve au mois d'août (223 mm). Le régime reste unimodal avec août, le mois le plus pluvieux.

Tableau 25 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kidira 14°28 N 12°13 O Altitude 35 m de 1950 à 2008

Kidira 1950-2008	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Nombres d'observations	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Nombres d'observations manquantes	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Moyennes	0,04	0,2	0	0	9,85	76,1	156	223	136	40,1	1,48	0,19	643
Ecart-type	0,27	1,34	0	0	20,4	42,1	73,1	93,6	73,7	45,4	4,82	1,31	163
Coefficient de variation	7,28	6,62	0	0	2,07	0,55	0,47	0,42	0,54	1,13	3,25	6,92	0,25
Maximum de la série	2	9,7	0	0	85,4	178	385	455	359	222	22,9	9,5	1061
Minimum de la série	0	0	0	0	0	0	39,9	61,6	22,4	0	0	0	385
Ecart	2	9,7	0	0	85,4	178	345	393	336	222	22,9	9,5	676
Coefficients pluviométriques en %	0,01	0,03	0	0	1,53	11,8	24,3	34,7	21,1	6,23	0,23	0,03	100
Débuts saisons pluvieuses en %					51,8	46,4	1,8						100
Maximum saisons pluvieuses en %							39,6	54,7	5,66				100
Fin saisons pluvieuses en %									10,7	71,4	17,9		100

Aux stations de Gourbassi et de Kayes, l'année pluvieuse dure 6 à 7 mois avec le maximum en août.

Tableau 26 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Gourbassi 13°24 N 11°28 O Altitude 79 m de 1960 à 2008

Gourbassi 2001-2008	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	
Observation manquantes	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Moyenne	0,1	0,13	0,34	1,29	27,3	96,9	191	266	153	36,9	1,1	0	746	
Ecart-type	0,59	0,94	1,9	5,04	32,7	42,7	84,3	108	71,9	32,4	3,28	0	264	
Coefficient de variation	6,15	7,42	5,6	3,9	1,2	0,44	0,44	0,41	0,47	0,88	2,97	0	0,35	
Maximum de la série	4,3	7	13	29	132	209	385	563	350	113	17	0	1269	
Minimum de la série	0	0	0	0	0	24,9	59,5	125	38,9	0	0	0	0	
Ecart mm	4,3	7	13	29	132	184	326	438	311	113	17	0	1269	
coefficient pluviométrique en %	0,1	0	0	0	5,37	14,7	26,5	35,7	15,9	1,74	0	0	100	
Début saison pluvieuse en %				10,0	83,3	6,7							100	
Maximum saison pluvieuse en %							16,4	76,4	7,27				100	
Fin saison pluvieuse en %									6,7	80,0	13,3		100	

L'évolution de la pluie aux différentes stations (Tambacounda, Bakel, Kidira, Gourbassi et Kayes) est similaire, l'année pluvieuse dure parfois 6 à 7 mois, le maximum est en août. Le régime est unimodal.

Tableau 27 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kayes 14°26 N 11°36 O Altitude 46 m de 1950 à 2008

Kayes	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	NJP
Nombre d'observations	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	
Observation manquantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Moyenne	0	0	0,02	0,12	9,8	52,9	168	202	109	40	0,04	0,17	581	
Ecart-type	0	0	0,13	0,86	15,5	41,8	65,6	68,9	85,5	53,5	0,29	1,22	27,8	
Coefficient de variation	0	0	7,42	7	1,58	0,79	0,39	0,34	0,78	1,34	6,86	7,35	0,05	
Maximum de la série	0	0	1	6	51	135	263	355	268	207	2	9	56	
Minimum de la série	0	0	0	0	0	0	75	134	0	0	0	0	56	
Ecart mm	0	0	1	6	51	135	188	221	268	207	2	9	0	
coefficient pluviométrique en %	0	0	0,01	0,09	7,69	39,5	125	150	81,4	29,9	0,03	0,12	100	
Début saison pluvieuse en %				20,8	73,6	5,7							100	
Maximum saison pluvieuse en %								41,4	50	8,62			100	
Fin saison pluvieuse en %									1,9	73,6	24,5		100	

Dans les trois domaines climatiques, le coefficient pluviométrique est plus élevé au mois d'août avec 29 % à Tambacounda, 27 % à Kédougou et 23 % à Labé.

Tableau 28: Fréquence d'apparition du maximum pluviométrique, des débuts et des fins de saison pluviométrique en %

Descripteurs	Stations	Séries années	J	F	M	A	M	J	J	J	J	A	S	O	S	O	N	D
			%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Domaine nord soudanien	Tambacounda	58				12,3	70,2	17,5		2	31	48	19			57,9	42,1	
	Gourbassi	55				10,0	83,3	6,7			16,4	76,4	7,27		6,7	80,0	13,3	
	Kayes	58				20,8	73,6	5,7				41,4	50	8,62	1,9	73,6	24,5	
	Kidira	53					51,8	46,4	1,8		39,6	54,7	5,66		10,7	71,4	17,9	
	Bakel	59					70,9	27,3	1,8		23,2	44,6	32,1		1,8	80,0	18,2	
Domaine sud soudanien	Kédougou	58				44,1	54,2	1,7		1,7	15,5	57	25,8			67,8	32,2	
	Saraya	51				41,2	51,0	7,8			18,8	56,3	25			51,0	49,0	
	Fongolimbi	44				39,5	58,1	2,3			25	54,5	20,5			65,1	34,9	
	Kéniéba	52				44,2	53,8	1,9			23,5	64,7	11,8		7,7	73,1	19,2	
Domaine guinéen	Mali	68			25,0	58,8	14,7	1,5			9	68,6	22,4			32,4	67,6	
	Tougué	64			34,4	54,7	10,9			1,6	31,2	56,2	11			25,0	75,0	
	Labé	79			54,8	45,2				4	23,5	51	21,5			6,8	93,2	
Caractéristiques			Début saison pluvieuse en %						Maximum saisons pluvieuses en %						Fin saison pluvieuse en %			

La variabilité est aussi perçue au niveau des débuts et fins de saison aux différentes stations (Tableau 28) :

- A la station de Labé, la saison des pluies débute le plus souvent en mars (54,8 %), ou en avril (45,2 %) et se termine en novembre avec 93,2 %.
- A la station de Kédougou, le début de la saison des pluies est en mai (54,2 %) ou avril (44,1 %) et la fin en octobre (67,8 %) ou novembre (32,2 %).
- A la station de Tambacounda, la saison des pluies commence le plus souvent en mai (70,2 %) et s'achève en octobre (57,9 %) ou novembre (42,1 %).

L'analyse de tous ces paramètres montre la variabilité mensuelle des précipitations dans le bassin.

L'évolution de la pluie en années extrêmes étudiée dans les trois régimes climatiques du bassin montre que toutes les années de maxima extrêmes sont localisées dans la période humide et les années de minima extrêmes dans la période sèche (1992-2008).

En régime guinéen à la station de Labé, l'année 1958 est l'année la plus pluvieuse avec 2159 mm et le mois d'août enregistre le maximum (573 mm), ce qui confirme la stabilité du régime. Quant à l'année la plus sèche (1996) avec 946, le maximum s'établit au mois de juillet (303 mm) et caractérise l'instabilité du régime.

En régime sud soudanien à la station de Kédougou, l'année 1956 enregistre le maximum de la série avec 2160 mm et septembre, le mois du maximum (543 mm), d'où l'instabilité du régime. L'année 1993 est la plus sèche avec 893 mm et le maximum noté au mois d'août (299 mm), indiquant la stabilité du régime.

En régime nord soudanien à la station de Tambacounda, l'année 1954 correspond à l'année la plus pluvieuse avec 1246 mm et septembre le mois du maximum (543 mm). L'année le plus sèche est 1993 avec 434 mm pour un maximum de 146 mm au mois de juillet. Les deux années extrêmes témoignent de l'irrégularité de ce régime.

De plus, l'évolution mensuelle des précipitations aux années humides est bimodale à des stations comme Labé et Kédougou, contrairement aux années sèches où elle est partout unimodale.

V.2.2 La variabilité annuelle de la pluie dans le bassin

La variabilité de la pluviométrie dans le bassin est étudiée pour les pluies annuelles, mensuelles et journalières. Nous étudions la variabilité interannuelle et spatiale.

La **Figure 13** met en relation la hauteur de pluie et la latitude des stations pluviométriques du Sud au Nord du bassin, correspondant aux domaines climatiques du bassin.

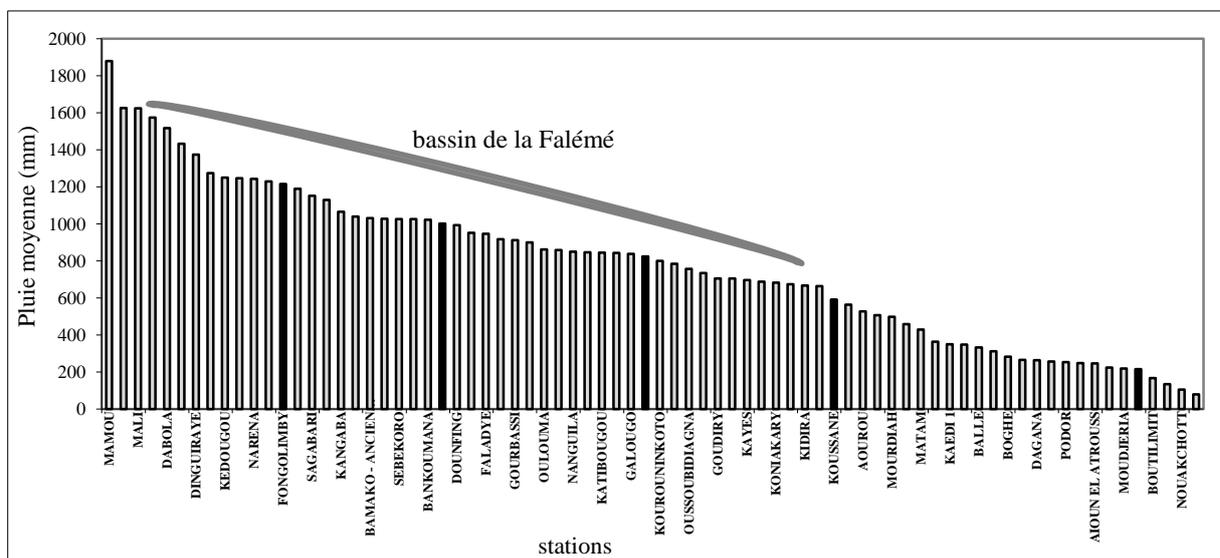


Figure 13 : Stations pluviométriques selon la latitude et la hauteur de pluies moyennes 1950-2008

Dans chaque domaine, trois stations de base sont retenues par l'analyse (Labé, Tougué et Mali pour le domaine guinéen ; Kédougou, Saraya, et Fongolimbi pour le domaine sud soudanien ; Tambacounda, Bakel et Kidira pour le domaine nord soudanien). Les valeurs caractéristiques de la variabilité pluviométrique annuelle sont représentées dans le **Tableau 29**.

Les coefficients de variation (C.V) et les intervalles de variation (I.V) montrent une variabilité annuelle du Sud au Nord du bassin.

- Dans le domaine guinéen, le C.V varie entre 0,20 à Labé et Tougué et de 0,40 à la station de Mali.
- Dans le domaine sud soudanien, il n'est que de 0,20 à Kédougou et Fongolimbi, et 0,30 à Saraya.
- Dans le domaine nord soudanien, il se situe entre 0,30 à Tambacounda et 0,20 à Bakel et à Kidira.

Tableau 29 : Variabilité des précipitations dans les différents régimes pluviométriques du bassin

Domaines climatiques	Domaine guinéen		Domaine sud soudanien		Domaine nord soudanien	
	Labé 1921-2000		Kédougou 1950-2007		Tambacounda 1950-2007	
Stations	Pmm	Année	Pmm	Année	Pmm	Année
Moyenne	1603		1227		808	
Ecart-type	289		250		209	
Coefficient de variation	0,20		0,20		0,3	
Maximum de la série	2159	1958	2160	1954	1316	2006
Minimum de la série	946	1996	585	2007	434	1993
Intervalle de variation	1213		1575		882	
Stations	Tougué 1922-2000		Saraya 1950-2000		Bakel 1950-2008	
	Pmm	Année	Pmm	Année	Pmm	Année
Moyenne	1530		1120		521	
Ecart-type	290		299		137	
Coefficient de variation	0,20		0,30		0,20	
Maximum de la série	2228	1957	2183	1951	900	1968
Minimum de la série	1021	1986	622	1996	259	2005
Intervalle de variation	1207		1561		641	
Stations	Mali 1923-2000		Fongolimbi 1963-2006		Kidira 1950-2008	
	Pmm	Année	Pmm	Année	Pmm	Année
Moyenne	1706		1147		643	
Ecart-type	250,6		203		163	
Coefficient de variation	1,40		0,20		0,20	
Maximum de la série	2287	1972	1732	2000	1061	1961
Minimum de la série	1030	1964	868	1983	385	1968
Intervalle de variation	1257		864		676	

Les valeurs élevées montrent la grande variabilité de la pluie dans les trois domaines climatiques du bassin.

Les intervalles de variation qui sont la différence entre les extrêmes pluviométriques montrent aussi cette grande variabilité. Pour toutes les stations, les écarts sont élevés.

- Dans le domaine guinéen, ils sont de 1213 mm à Labé, 1207 mm à Tougué et de 1257 mm à Mali.

- Dans le domaine sud soudanien, les écarts sont beaucoup plus élevés aux stations de Kédougou avec 1575 mm, Saraya avec 1561 et Fongolimbi avec 864 mm.
- Dans le domaine nord soudanien, ils sont moins élevés comparés aux deux premiers domaines, en rapport avec la diminution de la pluviométrie respectivement 882 mm à Tambacounda, 641 mm à Bakel et 676 à Kidira.

L'analyse de la variabilité de la pluie à travers l'excédent ou le déficit de chaque année par rapport à la moyenne, peut être évalué par un certains nombre de paramètres.

V.2.2.1 Les indices du vecteur régional et leur variabilité

Les variations de la pluviométrie peuvent être appréciées à travers les fluctuations des indices du vecteur régional. La **Figure 14** montre la variation des indices des quatre vecteurs constitués. La valeur 1 du vecteur indique la pluviométrie moyenne régionale dans la zone d'application du vecteur et/ou du bassin de la Falémé ; les valeurs supérieures à l'unité, les années excédentaires et celles inférieures à l'unité, les années déficitaires.

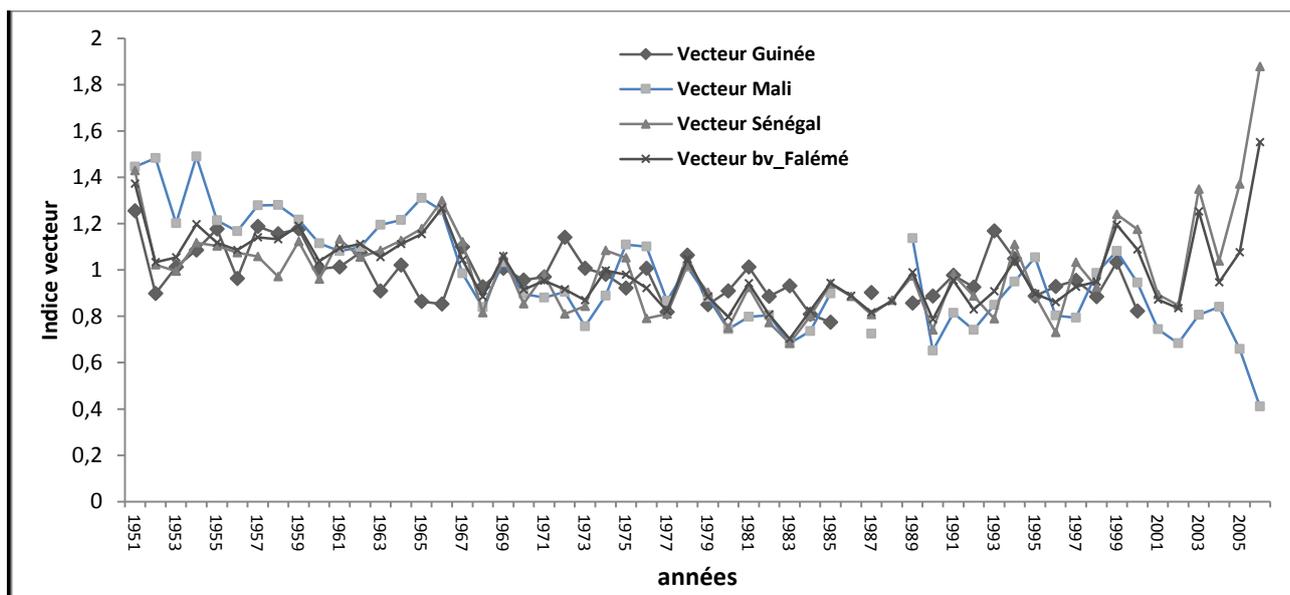


Figure 14 : Variations des indices des trois vecteurs régionaux et du vecteur Falémé de 1951 à 2006.

Le vecteur reproduit bien la tendance générale de la pluviométrie dans le bassin de la Falémé. Il est caractérisé par :

- une augmentation des variations annuelles en allant du Sud vers le Nord, de Labé à Bakel.
- de 1951 à 1967 : une période à pluviométrie globalement excédentaire malgré les déficits des années 1952-1953 dans la partie guinéenne du bassin. Cette période a une pluviométrie moyenne à excédentaire avec des fluctuations très faibles.
- de 1968 à 2003 : en domaine guinéen, on note de faibles déficits ne dépassant pas 20% et pouvant atteindre 35% dans le reste du bassin.

- A partir de 2004 : le retour de la pluie affecte l'ensemble du bassin avec des valeurs en dessus de 1.

L'évolution annuelle de la pluviométrie se fait en dents de scie (alternant des pics et des creux) correspondant à des années excédentaires et déficitaires par rapport à la moyenne de la série.

V.2.2.2 Les indices d'anomalie pluviométrique et leur variabilité

La variabilité par l'indice de Lamb est caractérisée aux trois domaines climatiques du bassin. L'indice d'anomalie pluviométrique développé par Lamb (1983)⁶⁰, est la différence entre la pluviométrie annuelle et la pluviométrie moyenne divisée par l'écart type de la série.

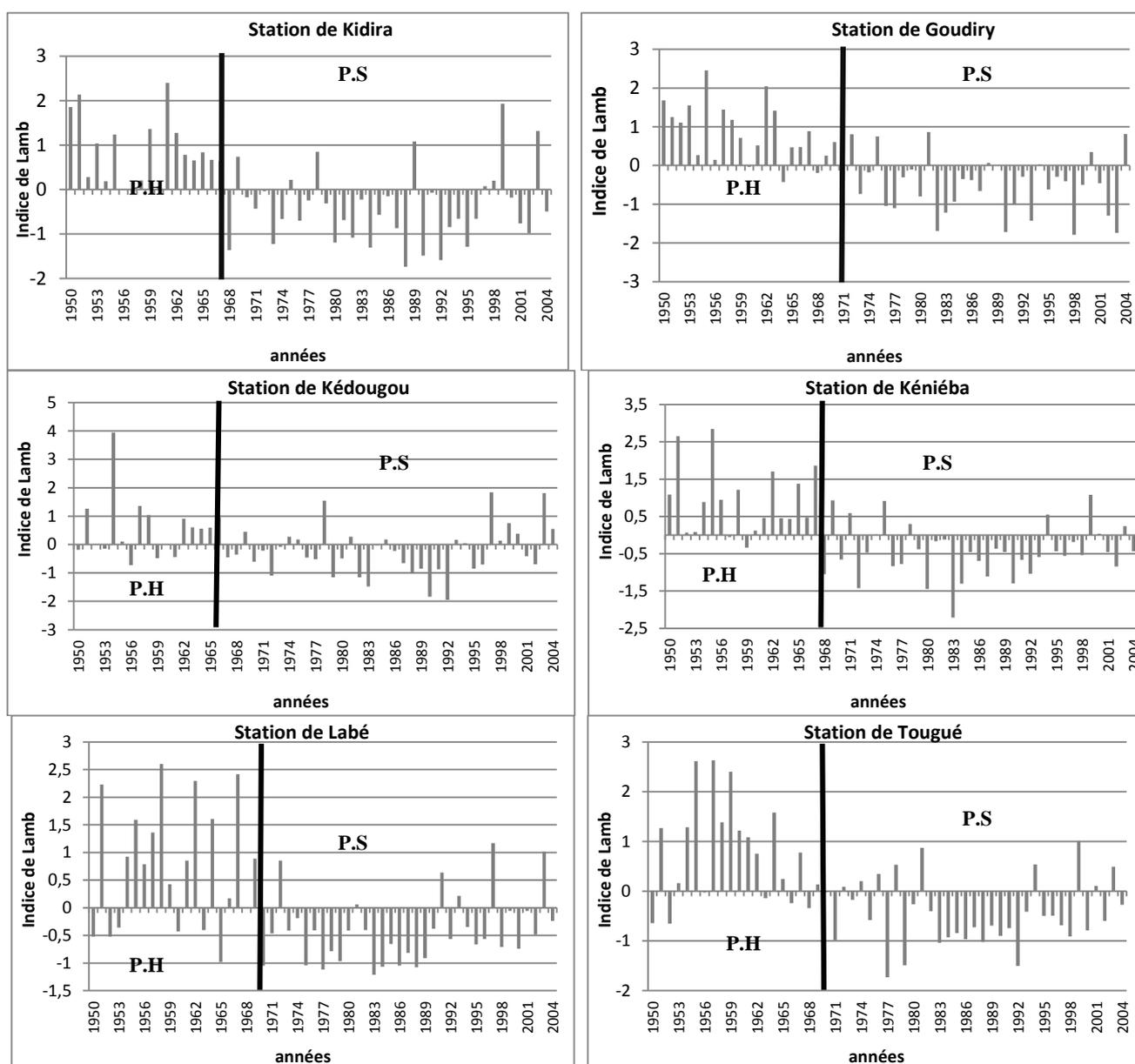


Figure 15 : Evolution des précipitations exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique selon la méthode de Lamb (PH : Période Humide, PS : Période Sèche)

⁶⁰ Lamb P., 1983: Persistence of subsaharan drought. Nature, 299 : pp 46-48.

La **Figure 15** représente l'évolution annuelle des pluies à Labé, Tougué, Kédougou, Kéniéba, Goudiry et Kidira exprimée en fonction de cet indice d'anomalie pluviométrique. On observe que de 1950 à 1968, les cumuls pluviométriques sont nettement supérieurs à la moyenne, les indices dépassent souvent la valeur 1. De 1968 à 2004, l'indice n'atteint nulle part la valeur 1, montrant ainsi une période de pluviométrie déficitaire.

V.2.2.3 *L'analyse de l'homogénéité des séries pluviométriques et déficits pluviométriques (test de rupture de Pettitt et procédure de segmentation)*

L'application de ce test à l'aide du logiciel Khronostat, développé par l'Institut Français de Recherche pour le Développement (IRD), donne les résultats du **Tableau 30**. Ces résultats montrent que les séries pluviométriques analysées présentent des ruptures comprises entre 1967 et 1972 (à l'exception de la station de Mali où la rupture est notée en 1964 et la station de Kédougou en 1966), avec des seuils de confiance de 90%. Les ruptures décelées correspondent à une baisse significative de la moyenne des précipitations au cours du 20^{ème} siècle notamment depuis la fin de la décennie 60 et le début de la décennie 70. Cette baisse s'est amplifiée au cours de l'année 1983. Ces ruptures ont permis de déterminer les différentes périodes de fluctuations pluviométriques du bassin versant de la Falémé.

Tableau 30 : Résultats des tests de rupture (1950-2004)

Descripteurs	Statistiques de 1950-2004						Test de Pettitt		Procédure de segmentation
	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart -type	Min/Max	Cv	Rupture	Probabilité	Rupture
Labé	1310	2159	1580	223	0,61	0,14	1969	2,37.10⁻³ (99%)	1969
Mali	1237	2198	1574	225	0,56	0,14	1964	2,77.10⁻² (95%)	1957 ; 1993
Tougué	1056	2229	1522	269	0,47	0,18	1970	1,87.10⁻⁴ (99%)	1967
Faléa	871	2163	1391	271	0,4	0,2	1967	4,69.10⁻⁶ (99%)	1967
Guene - gore	810	1599	1209	209	0,51	0,17	1971	1,39.10⁻⁴ (99%)	1976 ; 1992
Kéniéba	647	1914	1201	250	0,34	0,21	1967	8,22.10⁻⁵ (99%)	1967
Bakel	235	903	506	137	0,26	0,27	Absence de rupture	-	1998
Fongolimbi	749	1788	1205	242	0,42	0,2	1969	1,49.10⁻⁴ (99%)	1966 ; 1983
Goudiry	426	1019	676	140	0,42	0,21	1972	9,61.10⁻⁶ (99%)	1972
Kédougou	772	2160	1230	236	0,36	0,19	1966	6,86.10⁻² (95%)	1966
Kidira	319	1059	629	179	0,3	0,28	1967	1,73.10⁻⁴ (99%)	1967
Saraya	378	2620	1082	342	0,14	0,32	1967	6,54.10⁻⁵ (99%)	1964

On peut définir globalement une période humide (pluviométrie excédentaire) avant l'année 1970 et une période sèche (pluviométrie déficitaire) après cette date. Cette sécheresse semble avoir touché d'abord les bassins inférieur et moyen (1967 à Kidira) avant d'atteindre finalement le bassin supérieur (1969 à Labé). La longue période sèche amorcée depuis les années 1970 persiste toujours même si ces dernières années, on note le retour de la pluie. Les ruptures observées ont des niveaux de signification qui varient d'une série à une autre. Selon le test de Pettitt, des ruptures très significatives (seuil d'erreur <1%) ont été détectées en 1967 au niveau des stations de Faléa, Kéniéba, Kidira et en 1972 à Goudiry. Des ruptures significatives (1% < seuil d'erreur <5%) sont détectées au niveau des séries de Mali (1964), Kédougou (1966). Les ruptures identifiées sont concentrées généralement entre 1968 et 1970.

En cas de rupture dans les séries chronologiques suivant le test de Pettitt, les déficits pluviométriques de part et d'autre ont été calculés. En absence de rupture suivant toujours le même test (le cas de la station de Bakel), l'année de référence choisie comme rupture est l'année 1970. Les différents résultats obtenus fluctuent entre 13,9 % (Kédougou) et 30,5% (Saraya) (Tableau 31).

Tableau 31 : Déficit pluviométriques des stations du bassin suivant le Test de Pettitt (1951-2004)

Descripteurs	Référence	Avant la rupture		Après la rupture		Déficit en %
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Bakel	1970	521,6	154	496,3	126	4,9
Kidira	1967	784,1	132	554	149	29,3
Guene - gore	1971	1339,1	157	1097,1	205	18,1
Kéniéba	1967	1426,9	227	1090,4	178	23,6
Goudiry	1972	833,3	102	642,6	88,8	22,9
Kédougou	1966	1360,2	255	1171,2	204	13,9
Faléa	1967	1677,3	197	1251,9	177	25,4
Fongolimbi	1969	1329,8	175	1110,5	216	16,5
Saraya	1967	1360,4	417	946	189	30,5
Mali	1964	1867,5	222	1467,9	130	21,4
Tougué	1970	1820,8	275	1422	178	21,9
Labé	1969	1745,8	250	1498,9	137	14,1

Les stations du Nord du bassin (comme Kidira) enregistrent les déficits pluviométriques les plus importants (Tableau 31). Les plus faibles valeurs sont enregistrées au Sud du bassin.

Les résultats confirment que la pluviométrie moyenne a diminué après 1970 sur l'ensemble du bassin de la Falémé et beaucoup plus dans la partie nord.

L'application du test à des séries plus longues (1923-2004) donne les résultats du Tableau 32 pour quatre stations.

Tableau 32 : Résultats des tests de rupture (1923-2004)

	Test de Pettitt		Procédure de segmentation
	Rupture	Probabilité	Rupture
Labé	1969	$6,99 \cdot 10^{-6}$ (99%)	1969
Kéniéba	1967	$2,65 \cdot 10^{-6}$ (99%)	1967
Kédougou	1966	$2,01 \cdot 10^{-2}$ (95%)	1929
Kidira	1967	$2,03 \cdot 10^{-6}$ (99%)	1967

On observe une rupture détectée en 1966 à Kédougou (Tableau 32 et Figure 16), une diminution de la pluviométrie au cours des décennies 1970 et 1980, faisant suite à deux décennies humides (1950-1970).

Les représentations graphiques des indices annuels, au niveau des stations disposant des données de longues périodes d'observation (Labé, Kéniéba, Kédougou et Kidira) sur la période 1923-2004, ont permis de situer la variabilité pluviométrique au-delà des tests de rupture. En effet, les différents tests ont permis d'identifier des périodes homogènes.

Dans le Nord du bassin (bassin inférieur), la station de Kidira montre une période humide entre 1923 et 1967 avec une moyenne interannuelle de 784,1 mm et un écart-type de 131,5 mm (Figure 16, a). Une période sèche est observée de 1968 à 2004, avec une moyenne interannuelle de 554 mm et un écart-type de 148,6 mm, avec une période de sécheresse très marquée entre 1981 et 1983. Les années 2000 montrent une pluviométrie moyenne qui connaît une hausse (par exemple 865,0 mm en 2003).

Dans le bassin moyen à la station de Kéniéba, on observe aussi une période humide entre 1923 et 1967 caractérisée par une moyenne interannuelle de 1426,9 mm et un écart-type de 227,2 mm (Figure 16 ; b). Elle est suivie par une période sèche allant de 1968 à 2004, avec une pluviométrie moyenne de 1090,4 mm et un écart-type de 177,7 mm. A partir des années 2000 (1260,7 mm en 2003), on observe un retour à une pluviométrie excédentaire.

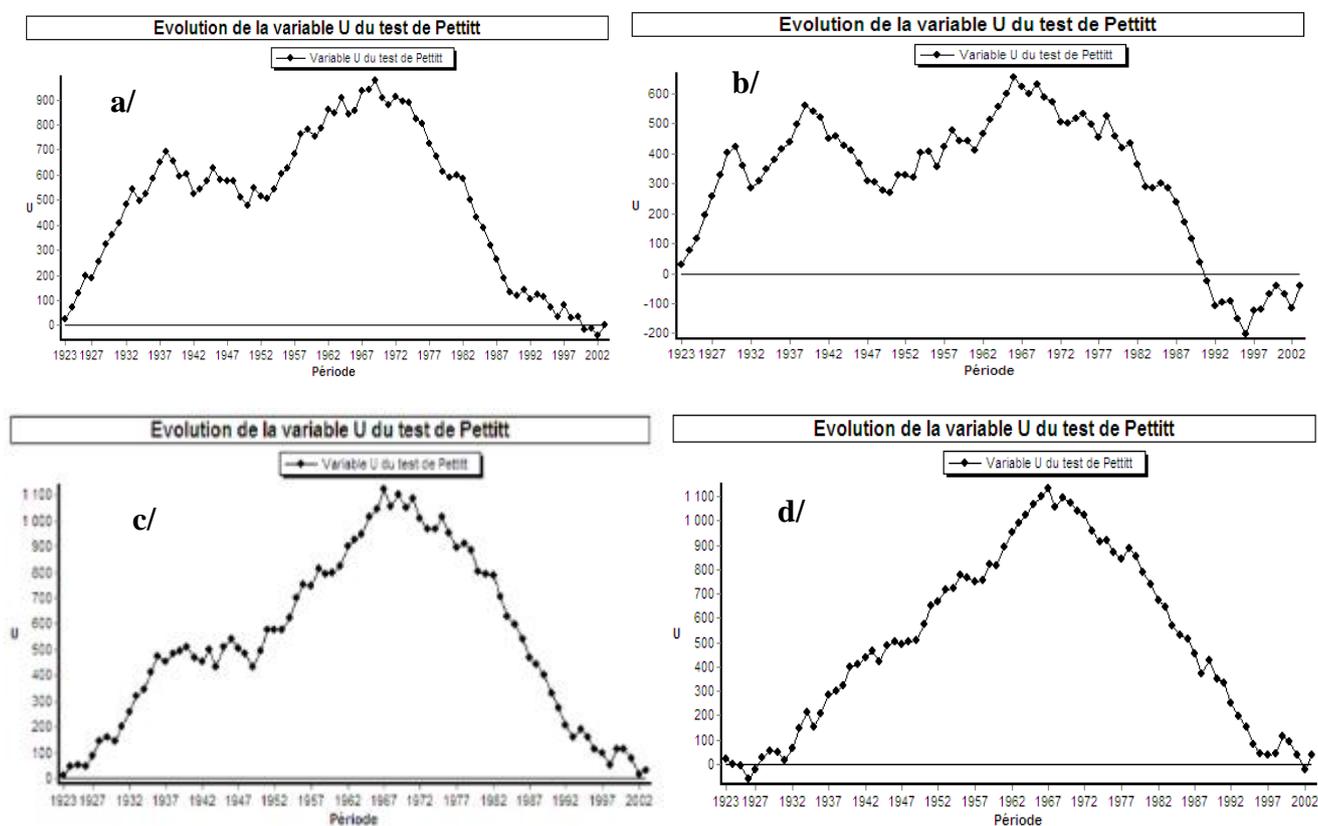


Figure 16 : Test de Pettitt appliqué aux séries pluviométriques annuelles (1923-2004) : a- Labé ; b- Kédougou ; c- Kéniéba ; d-Kidira.

Dans le Sud du bassin (bassin supérieur), la station de Labé (Figure 16 ; c) montre :

- une période humide entre 1923 et 1969, caractérisée par une moyenne interannuelle de 1745,8 mm et un écart-type de 249,7 mm.
- une période sèche allant de 1970 à 1999, caractérisée par une moyenne interannuelle de 1498,9 mm et un écart-type de 137,4 mm.
- A partir des années 2000, avec une pluviométrie moyenne atteignant 1805,4 en 2003.

V.2.2.4 L'analyse fréquentielle de la pluviométrie annuelle

Les séries de pluies annuelles des stations du bassin ont été ajustées à différentes lois statistiques (Brunet-Moret Y, 1969). Parmi ces lois statistiques, on peut citer entre autres : Gauss, Gumbel, Goodrich, Galton, Pearson 3, Pearson 5, Frechet, Fuites, Polya... La loi de Goodrich présente le meilleur ajustement, par méthode graphique, pour l'ensemble des stations étudiées du bassin (Tableau 33 et Figure 17).

Tableau 33 : Pluies annuelles fréquentielles pour les principales stations du bassin (1951-2008).

Descripteurs	Récurrences sèches						Médiane	Récurrences humides						K3
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,33		0,5	0,67	0,8	0,9	0,95	0,98	
Réurrence	100	50	20	10	5	3	2	3	5	10	20	50	100	K3
Mali	1042	1103	1205	1306	1435	1560	1692	1823	1946	2074	2177	2290	2363	1,59
Labé	1244	1263	1301	1346	1416	1495	1592	1701	1813	1942	2054	2184	2273	1,44
Tougué	1029	1049	1093	1147	1233	1333	1458	1600	1751	1925	2077	2258	2382	1,68
Faléa	904	933	988	1049	1140	1238	1352	1476	1600	1738	1854	1988	2078	1,66
Kédougou	827	849	892	942	1017	1099	1197	1304	1414	1537	1642	1764	1846	1,63
Guene - gore	778	816	881	946	1031	1114	1202	1290	1374	1461	1532	1610	1661	1,54
Kéniéba	701	737	803	872	969	1069	1180	1297	1410	1532	1634	1748	1824	1,76
Fongolimbi	580	661	783	890	1016	1128	1238	1340	1430	1520	1590	1663	1710	1,71
SARAYA	751	762	788	824	887	968	1077	1210	1359	1541	1708	1912	2057	1,87
Gourbassi	545	558	588	625	684	754	841	941	1046	1170	1278	1406	1495	1,87
Tambacounda	426	450	496	545	615	689	772	861	948	1044	1124	1215	1276	1,92
Gourbassi	416	433	466	501	551	603	663	725	787	854	910	974	1016	1,7
Kayes	344	351	369	397	450	522	626	760	916	1114	1302	1538	1711	2,81
Kidira	211	251	318	382	464	542	624	704	778	855	917	984	1028	2,24
Bakel	246	258	284	316	367	426	500	584	673	776	867	973	1047	2,45

Le rapport des pluies décennales humides et sèches donne l'indice d'irrégularité K3 de Rodier. La variabilité spatiale des pluies comme d'ailleurs l'ont montrée, jusqu'à présent toutes les études précédentes, demeure très forte quelle que soit l'échelle d'étude (journalière, mensuelle ou annuelle) et compte tenu des mécanismes en vigueur. Dans le haut bassin, K3 est de l'ordre de 1.4 à 1. (Mali : 1,59 ; Labé : 1,44) ; dans la zone sud soudanienne (bassin moyen), il est de 1,6 à 1,8 (Kédougou : 1,63 ; Saraya : 1,87) et en zone nord soudanienne (basse Falémé), il dépasse 2 (Kidira : 2,24 ; Bakel : 2,45).

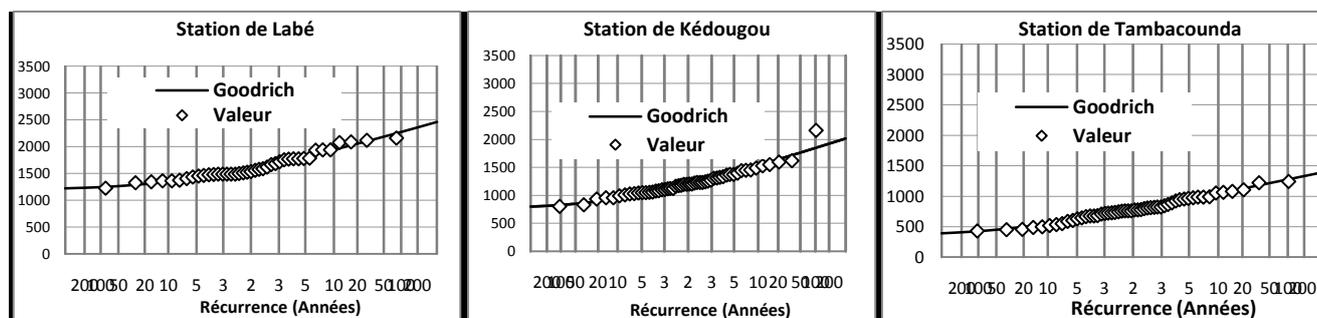
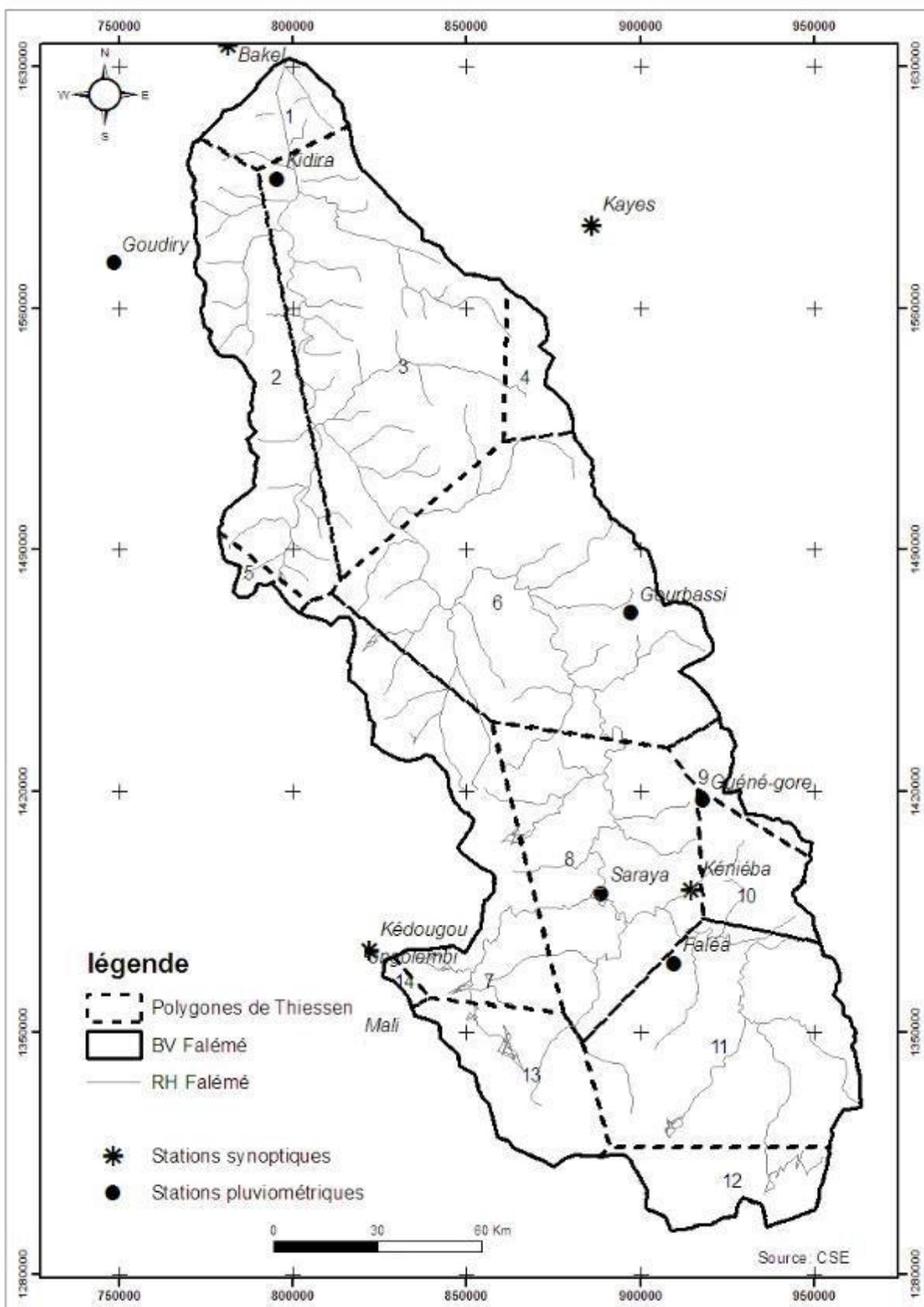


Figure 17 : Ajustement statistique des pluies annuelles à trois stations du bassin (1951-2008).

V.2.3 L'estimation de la pluie moyenne

Elle est faite avec la méthode de Thiessen. La carte suivante (Carte 17) donne les polygones pour chacune des stations prise en compte et le **Tableau 34** les stations par sous bassins. Au total 14 stations ont permis de construire les polygones.



Carte 17: Polygones de Thiessen appliqués au bassin versant de la Falémé

La lame d'eau moyenne reçue diminue du Sud du bassin vers le Nord conformément à l'évolution de la pluviométrie.

Tableau 34 : Pluie moyenne aux sous bassins de Fadougou, Gourbassi et Kidira.

Sous bassins		Valeurs moyennes en mm				
Noms	Aire (km ²)	Nombre de stations	Moy.Arith.	Thiessen	1/Distance ²	Krigeage
Fadougou	9300	4	1550	1380	1431	1415
Gourbassi	17100	10	1305	1180	1205	1198
Kidira	28900	15	1091	983	1036	1004

V.3 Les autres éléments du climat et leur variabilité dans le bassin

Nous analysons les vents, les températures, l'insolation, l'évaporation et l'humidité relative pour les stations synoptiques de Labé, Kédougou et Tambacounda, stations de base des domaines climatiques.

V.3.1 Les vents

➤ En domaine Guinéen à Labé

Les vents d'Est dominant la circulation de novembre à mars (5 mois) durant lesquels (**Tableau 35**) :

- Le secteur E enregistre les fréquences les plus élevées avec 42 % en janvier, 44 % en février et 33 % en mars ;
- Le reste de l'année, les vents d'Ouest dominant la circulation, avec le secteur W qui enregistre les fréquences les plus élevées.

Tableau 35 : Fréquences et directions des vents aux stations de Labé, Kédougou et Tambacounda

Labé 1971-2004											Kédougou 1970-2007											Tambacounda 1970-20007										
	N	NE	E	SE	S	SW	W	N W	Vent d'Est	Vent d'Ouest	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Vent d'Est	Vent d'Ouest	N	N E	E	SE	S	SW	W	N W	Vent d'Est	Vent d'Ouest		
J		10	42	25	7			3	77		4,1	22,9	45,8	14,5			8,3	2	83,2	10,3		34	52							86		
F	10	30	44	14					88		9,7	12,1	39	14,6		2,4	7,3	26,8	65,7	36,5		41	31							72		
M	3	20	33	3		10	7		56		2,3	6,9	11,6	6,9			16,2	51,1	25,4	67,3	10	52	7					3	59			
A		10	23		10,3	20	36		33	56	6	4	6	2			26	56	12	82	24	17				3	28	17	17	48		
M					20	23	44	10		77							43,5	56,5		100				3	14	76	3		93			
J					23,3	23	50			73						1	48,8	50,2		100					10	69	3		82			
J					13,3	27	53	7		87	2,7				3,7	5,5	50	38,8		94,3				3	17	55	3		75			
A					7	30	60			90	3					3	45,4	36,3		84,7				3	17	66			83			
S					10	23	50	3		76	6,2	4	4	4	4	12,5	25	37,5	12	75				4	29	50	4		83			
O				3	16,6	20	47	13		80	10,2	12,4	13,1	6	5	7	12,8	33	31,5	52,8					28	62	3		93			
N	3		23	17		17	33		40	50	8,8	13,3	17,7	6,6	6,6	13,3	11,1	24,4	37,6	48,8		7	39	18		4	11		64	15		
D	13	17	41	7		10			65		6,6	22,2	40	8,8	8,8	11	2,2		71	13,2		28	45	7					80			

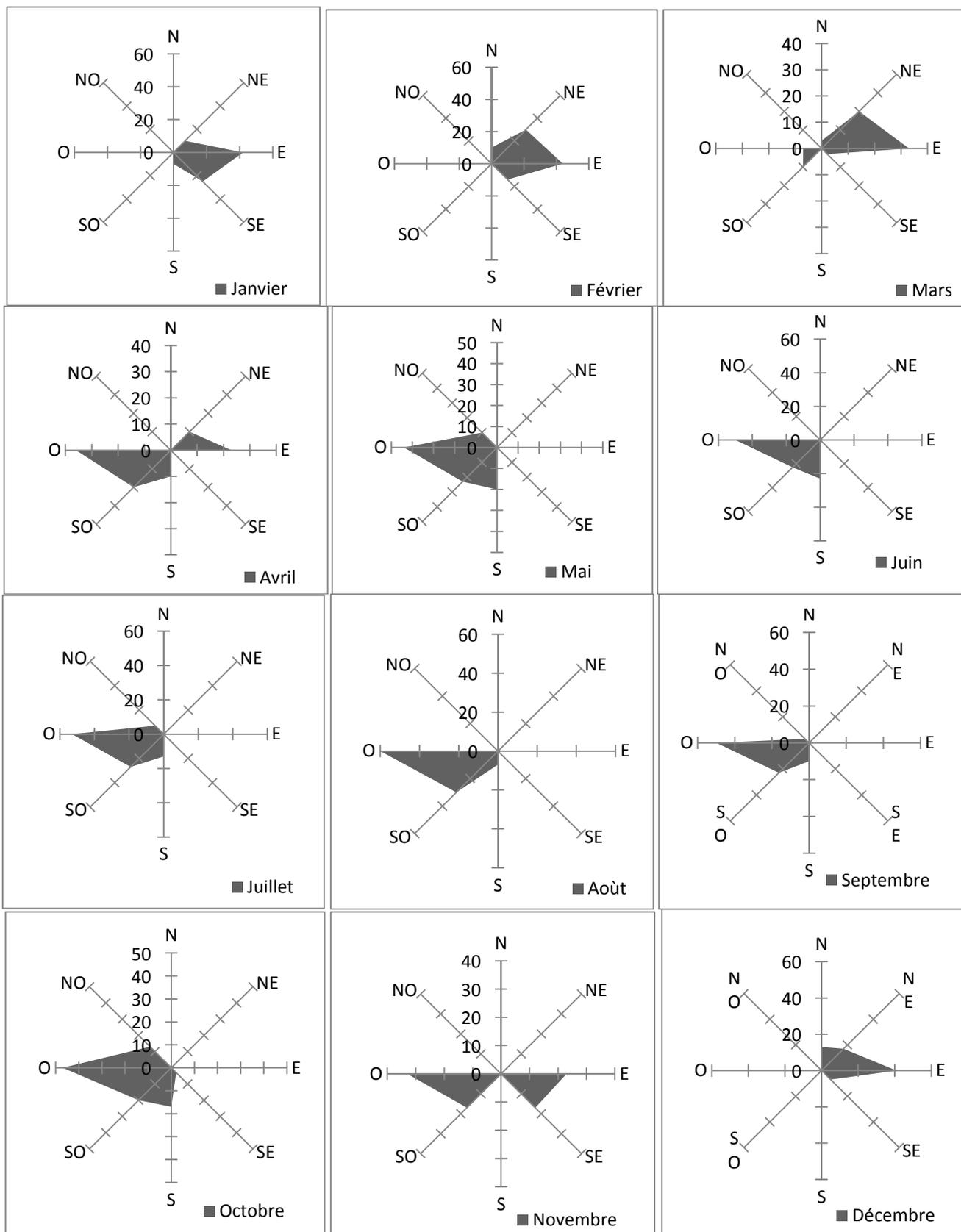


Figure 18 : Fréquences et directions des vents à la station de Labé (1971-2004)

➤ **En domaine Sud Soudanien à Kédougou:**

A la station de Kédougou (Tableau 35), les vents d'Est dominent la circulation de décembre à février avec les vents d'Est qui enregistrent les fréquences suivantes : décembre : 71 % ; janvier : 83,2 % ; février et 65,7 %.

Le reste de l'année est sous la domination des vents d'Ouest qui dominent :

- par le NO de mars à juin et de septembre à novembre ;
- et par le secteur W en juillet et août.

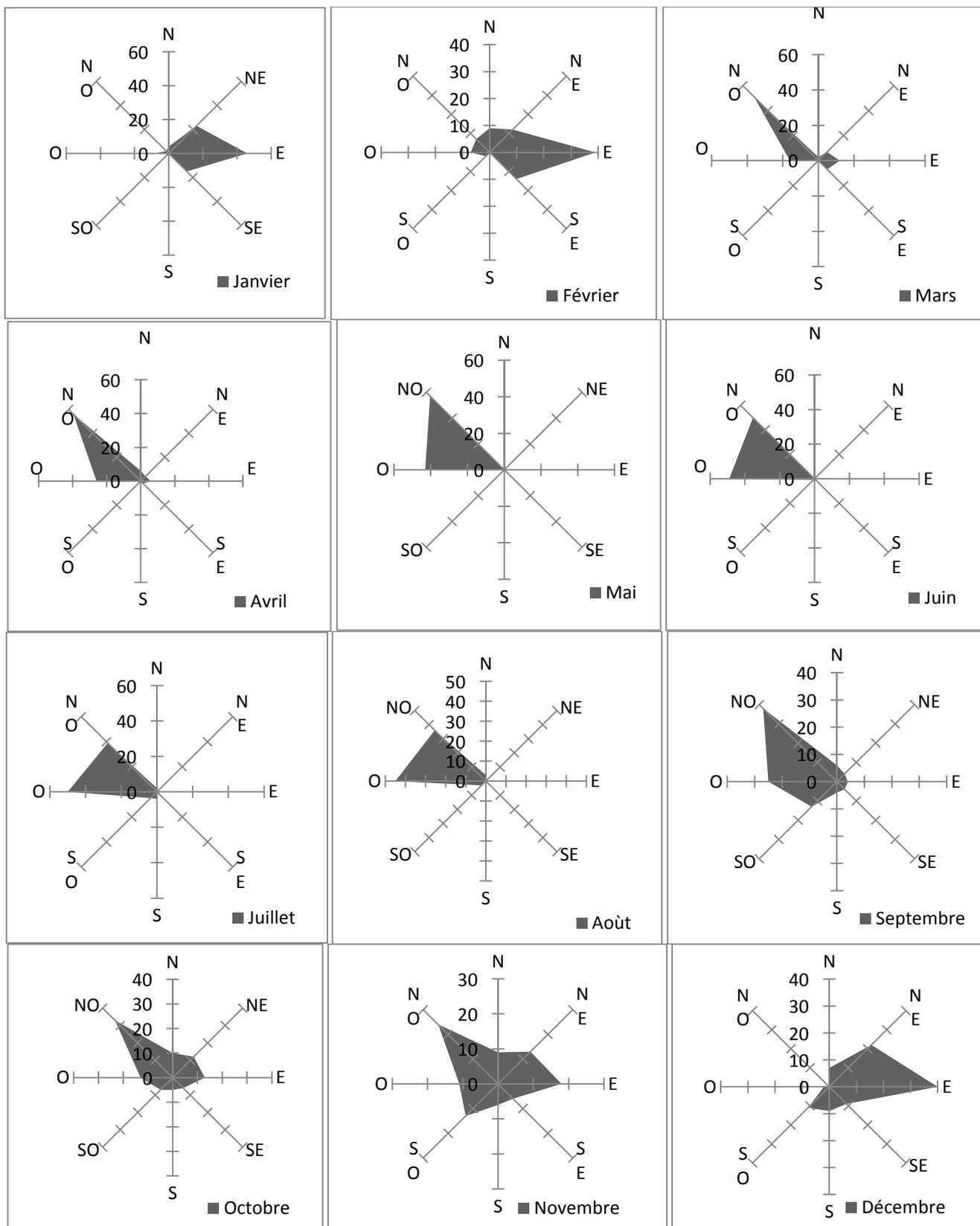


Figure 19 : Fréquences et directions des vents à la station de Kédougou (1970-2007)

➤ **En domaine Nord Soudanien à Tambacounda**

Dans ce domaine (Tableau 35), les vents d'Est dominent la circulation durant cinq mois de novembre à mars, surtout pour le secteur E.

Le reste de l'année, les vents d'Ouest dominent surtout par le secteur W.

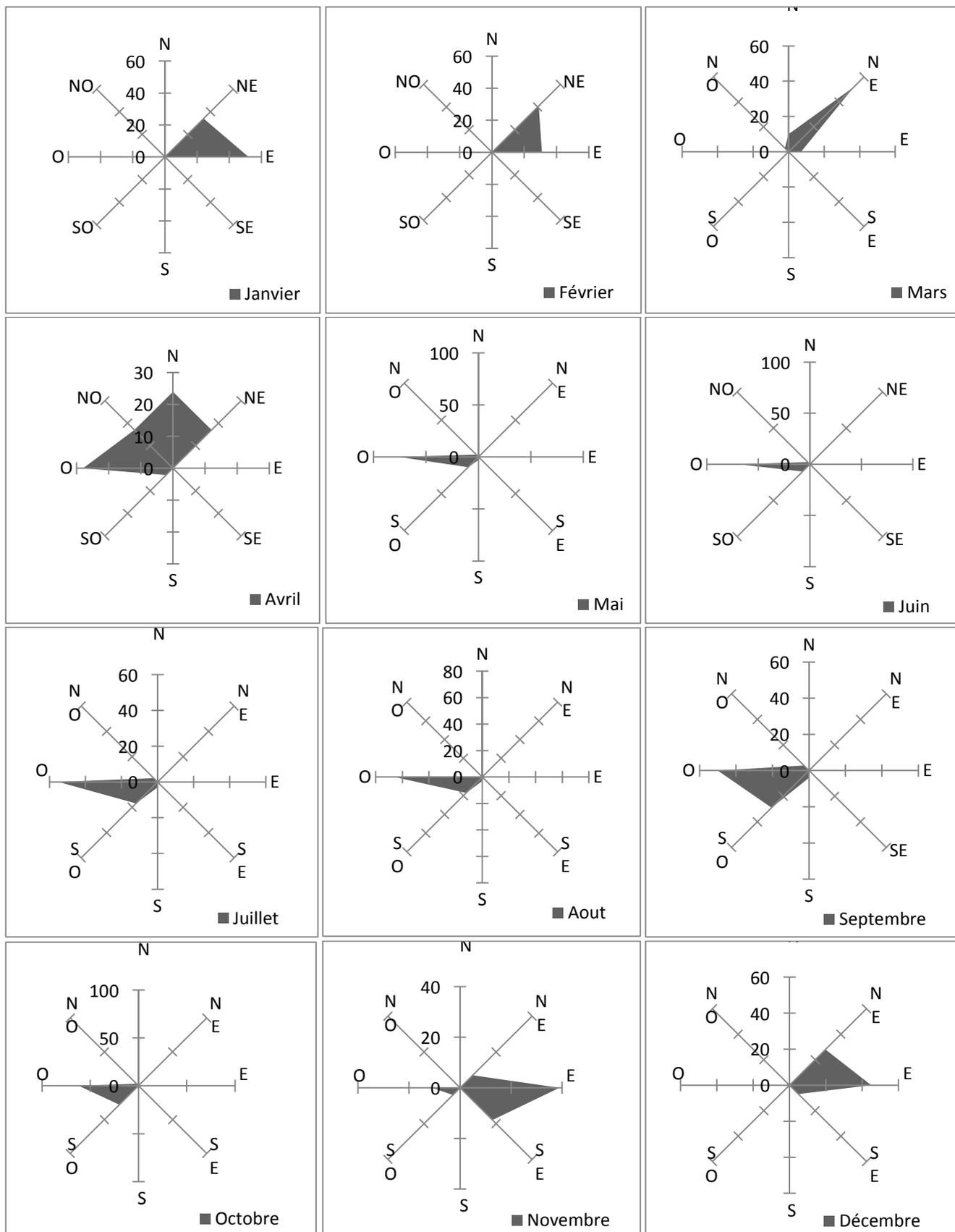


Figure 20 : Fréquences et directions des vents à la station de Tambacounda (1970-2007)

Ces vents ont des vitesses variables.

Tableau 36: Variation mensuelle de la vitesse du vent en m/s (1970-2000)

Descripteurs	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Labé	2,9	2,9	2,7	2,7	2,7	2,5	2,5	2,3	2,3	2	2,5	2,7	2,6
Kédougou	1,2	1,2	1,6	2,1	2,3	1,8	1,4	1,1	0,8	0,9	0,8	2	1,4
Tambacounda	2,8	2,8	2,6	2,4	2,7	2,9	2,4	2	1,5	1,5	1,6	2,3	2,3
Bakel	3,1	3,7	3,6	3	3,4	3	3,3	2,3	2	1,9	1,8	2,4	2,8

A la station de Labé (Tableau 36 et Figure 21) dans le domaine guinéen, le maximum intervient au mois de janvier et février avec 2,9 m/s, le minimum en octobre avec 2 m/s.

A la station de Kédougou (Tableau 36 et Figure 21) dans le domaine sud soudanien, le mois de mai enregistre le maximum avec 2,3 m/s. Les autres mois de l'année ont des vitesses faibles, le minimum se situant au mois de septembre et de novembre avec 0,8 m/s.

Aux stations de Tambacounda et Bakel (Tableau 36 et Figure 21) dans le domaine nord soudanien, les vitesses les plus élevées se situent entre novembre et juin et les plus faibles occupent le reste de l'année. A Tambacounda, le maximum atteint au mois de juin 2,9 m/s et le minimum au mois de septembre avec 1,5 m/s. A Bakel le maximum de mars atteint 3,6 m/s et le minimum de novembre 1,8 m/s.

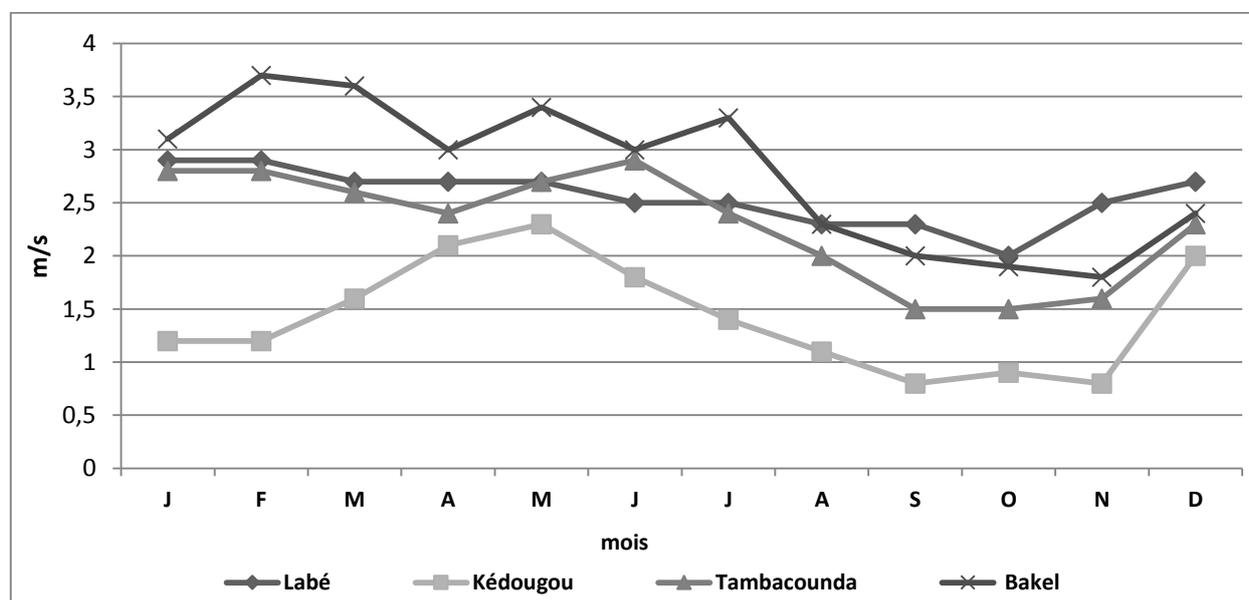


Figure 21 : Courbes de la vitesse moyenne du vent dans le bassin (période 1970-2007)

V.3.2 Les autres éléments du climat

Les valeurs de l'insolation à Labé, à Kédougou et à Tambacounda restent élevées et sont souvent supérieures à 260 heures. Au cours de l'année, l'évolution montre deux périodes (Tableau 37 et Figure 22) :

- Une période à fortes valeurs :

Les valeurs moyennes mensuelles de l'insolation sont très élevées durant la domination des flux du quadrant N à E. Le maximum est noté en janvier à Labé avec 265 h et à Kédougou en avril 273 h. Le minimum intervient durant la période pluvieuse où dominent les flux du quadrant S à O.

- Une période où les valeurs sont moins importantes quoique restant élevées et situées entre juin et octobre.
- Le minimum est partout noté en août.

Tableau 37 : Valeurs d'insolation moyennes mensuelles à Labé (1971-2004) Kédougou (1967-2004), Tambacounda (1967-2004) et Bakel (1984-2004)

Descripteurs	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Labé	265	244.2	258.3	234.6	205.7	185.5	152.0	142.9	161.2	198.0	237.3	254.1	212
Kédougou	231	212	247	273	256	229	207	193	209	240	246	251	233
Tambacounda	346	374	403	415	386	325	295	273	295	340	356	326	345

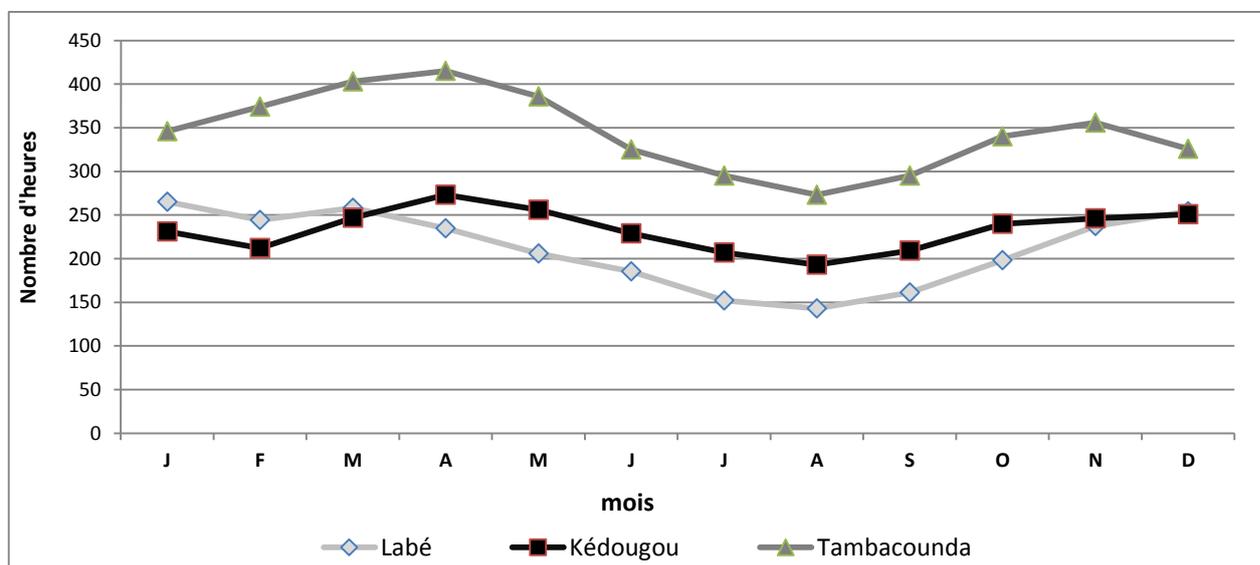


Figure 22 : Courbes de l'insolation moyenne mensuelle dans le bassin (période 1970-2007)

Le **Tableau 38** donne les valeurs caractéristiques des moyennes mensuelles et annuelles des températures aux stations de Labé, Kédougou, Tambacounda et Bakel.

Tableau 38: Données de température à Kédougou, Labé et Tambacounda

Descripteurs	Labé 1971-2005				Kédougou 1961-2007				Tambacounda 1950-2007				Bakel 1981-2004			
	TX	TN	TM	Am	TX	TN	TM	Am	TX	TN	TM	Am	TX	TN	TM	AM
Janvier	29,3	11,7	20,5	17,6	34,3	17,6	26	16,7	34,4	17	25,7	17,4	33,4	17,5	25,5	15,8
Février	31,4	13,1	22,2	18,2	37,1	19,7	28	17	36,9	19,4	28,1	17,5	36,4	19,9	28,1	16,5
Mars	32,5	15,8	24,2	16,7	38,7	23	30,8	15,7	39,2	22,1	30,7	17,2	39,3	22,1	30,7	17,2
Avril	33	18,4	25,7	14,6	39,7	25,6	31,2	12,9	40,5	24,5	32,5	16	42,2	24,9	33,5	17,3
Mai	31,1	19,2	25,2	11,9	38,7	25,8	32,2	12,9	40,1	26,1	33,1	14	42,4	27,8	35,1	14,7
Juin	28	18,5	23,2	9,54	34,4	23,4	28,9	11	36,5	25	30,7	11,5	40,2	27,6	33,9	12,6
Juillet	26	18,2	22,1	7,87	31,5	22,2	26,7	9,3	32,6	23,3	27,9	9,33	35,9	24,6	30,2	11,4
Août	25,8	18,1	21,9	7,63	31,2	21,7	26,3	9,5	31,5	22,8	27,2	8,79	34	23,1	28,5	10,9
Septembre	26,4	17,8	22,1	8,64	31,7	21,4	26,5	10,4	32,4	22,5	27,4	9,91	34,5	22,8	28,6	11,7
Octobre	27,4	17,2	22,3	10,2	33,8	21,7	27,6	12	34,9	22,3	28,6	12,6	37,8	23,1	30,4	14,8
Novembre	28,5	13,9	21,2	14,6	34,7	19,2	26,8	15,5	36,5	19,1	27,8	17,4	37,5	19,9	28,7	17,6
Décembre	28,6	11,4	20	17,3	33,7	16,6	25	17,1	34,3	17	25,6	17,3	34	18,2	26,1	15,7
AN	29	16,1	22,6	12,9	35	21,5	28	13,3	35,8	21,6	28,7	14,2	37,3	22,6	30	14,7

(Températures moyennes mensuelles en °C: TX: moyennes maximales; TN: moyennes minimales; TM: moyennes mensuelles; Amplitude thermique moyenne en °C: Am).

- ❖ **A la station de Labé (Figure 23) :** Les maxima interviennent durant la domination des vents d'Est. Les températures moyennes maximales (TX) ont une évolution bimodale avec un maximum principal en avril : 33°C et un minimum principal en août : 25,8°C. Le maximum secondaire est enregistré en décembre : 28,6°C. La moyenne annuelle des températures maximales est de 29 °C. Les minima interviennent durant la domination des vents des directions S à O. Les températures minimales connaissent aussi une évolution bimodale avec un maximum principal en mars : 19.2°C et un minimum principal en décembre : 11,3°C, la moyenne annuelle étant de 15,1°C. Les amplitudes thermiques diurnes et les températures moyennes mensuelles ont la même évolution bimodale. La moyenne des températures moyennes est de 22,5°C.

- ❖ **A la station de Kédougou (Figure 23) :** Les températures, comparées à celle de Labé, sont plus élevées. Les courbes des températures connaissent de faibles fluctuations durant une année. Les maxima interviennent durant la domination des vents des directions N à E. Les températures moyennes maximales (TX) ont une évolution bimodale avec un maximum principal en avril : 39,7°C et un minimum principal en août : 31.2°C. Le maximum secondaire est en novembre : 34.7°C et le minimum secondaire en janvier : 34.3°C. La moyenne annuelle des températures maximales est de 35°C. Les minima interviennent durant la domination des vents d'Ouest. Les températures minimales (TN) connaissent aussi une évolution bimodale avec un maximum principal en mai : 25,8°C et un minimum principal en novembre : 19.2°C. La moyenne annuelle est de 21.5°C. Les températures moyennes mensuelles et l'amplitude thermique ont la même évolution annuelle.

- ❖ **Aux stations de Tambacounda et Bakel (Figure 23) :** A Tambacounda, l'évolution des températures moyennes mensuelles, comme à la station de Kédougou, montre que les maxima interviennent en période de domination des vents d'Est et les minima en période de domination des vents d'Ouest. Les températures sont globalement élevées avec une température moyenne annuelle de 28.7°C. La courbe des températures maximales est bimodale avec un maximum principal en avril : 40,5°C et un minimum principal en août : 31.5°C. Le maximum secondaire est en novembre : 36.5°C et le minimum secondaire en décembre : 34.3°C. Les minima interviennent durant la domination des vents d'Ouest. Les températures minimales (TN) ont aussi une évolution bimodale avec un maximum principal en mai : 26,1°C et un minimum secondaire en décembre et janvier : 17°C. Les températures moyennes mensuelles et l'amplitude thermique diurne suivent la même évolution, elles sont bimodales. La moyenne des températures moyennes annuelles est de 28,7°C. La station de Bakel confirme l'évolution notée à Tambacounda.

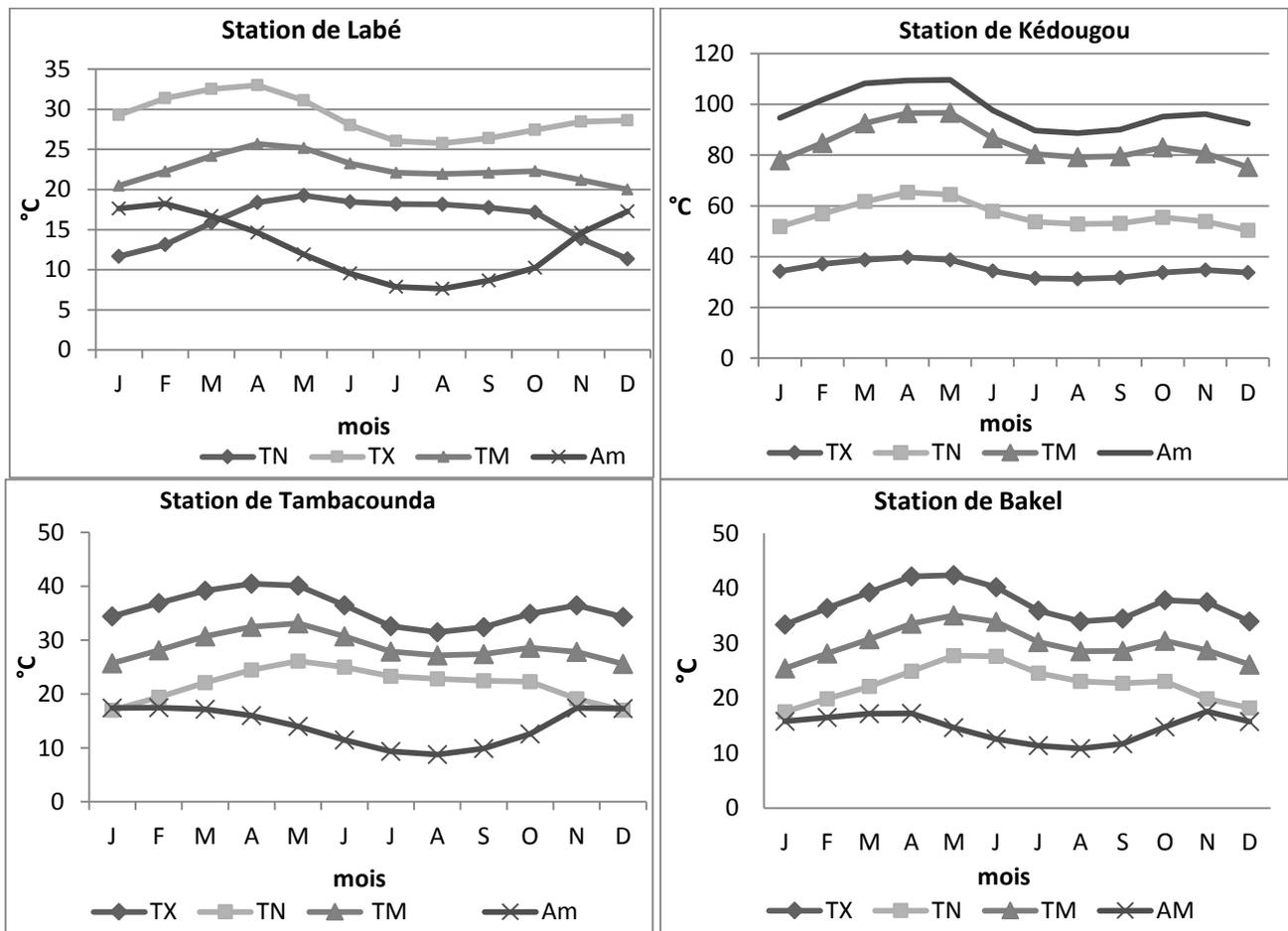


Figure 23 : Courbes des températures moyennes mensuelles en °C à Labé (1971 -2005), Kédougou (1961 -2007), Tambacounda (1950 -2007) et Bakel (1981 -2004)

Comme les autres éléments déjà évoqués, les valeurs de l'évaporation montrent deux périodes : une période d'octobre à mai durant laquelle l'évaporation est élevée et qui coïncide avec la circulation des vents d'Est ; une seconde de juin à novembre durant laquelle, elle est plus faible et qui coïncide avec la domination des vents d'Ouest. Le Tableau 39 donne les valeurs de l'évaporation aux stations d'analyse

Tableau 39 : Evaporation moyenne mensuelle à Labé (1970-2000) à Kédougou (1965-2007), à Tambacounda (1951-2007) et Bakel (1981-1997)

Descripteurs	Période d'observation	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN	
Labé	1970 - 2000	mois	228	206	241	224	162	131	46	30	49	85	175	224	1801
		jour	7,4	7,4	7,8	7,5	5,2	4,5	1,4	1	1,6	2,7	5,8	7,2	
Kédougou	1968 - 2007	mois	109	122	163	139	114	58	29	23	22	33	63	92	966
		jour	3,5	4,4	5,2	4,6	3,7	2	1	0,7	0,7	1	2	0,1	
Tambacounda	1951 - 2007	mois	115	128	138	135	125	81	43	27	24	37	73	101	1027
		jour	3,7	4,6	4,5	4,5	4	2,7	1,4	0,9	0,8	1,2	2,4	3,3	
Bakel	1981 - 1997	mois	112	129	136	147	136	124	72,5	45,3	37,9	62,5	91,4	101	1194
		jour	3,6	4,6	4,38	4,9	4,37	4,14	2,34	1,46	1,26	2,02	3,05	3,25	

A Labé, le maximum est enregistré durant le mois de mars avec 241 mm, le minimum au mois d'août avec 30 mm. La moyenne annuelle est de 150 mm et le total annuel de 1801 mm.

A Kédougou, les valeurs de l'évaporation sont plus élevées comparées à celle de Labé. Le maximum est enregistré durant le mois de février avec 163 mm, le minimum au mois de septembre avec 22,2 mm. La moyenne annuelle est de 80,2 mm et le total annuel de 966 mm, valeur relativement faible comparée à celle de Labé.

A Tambacounda, le maximum est enregistré durant le mois de mars avec 138 mm, le minimum aux mois de septembre avec 23,8 mm comme à Kédougou. La moyenne annuelle est de 85,6 mm et le total annuel de 1027 mm. A Bakel le maximum est noté en mai avec 147 mm.

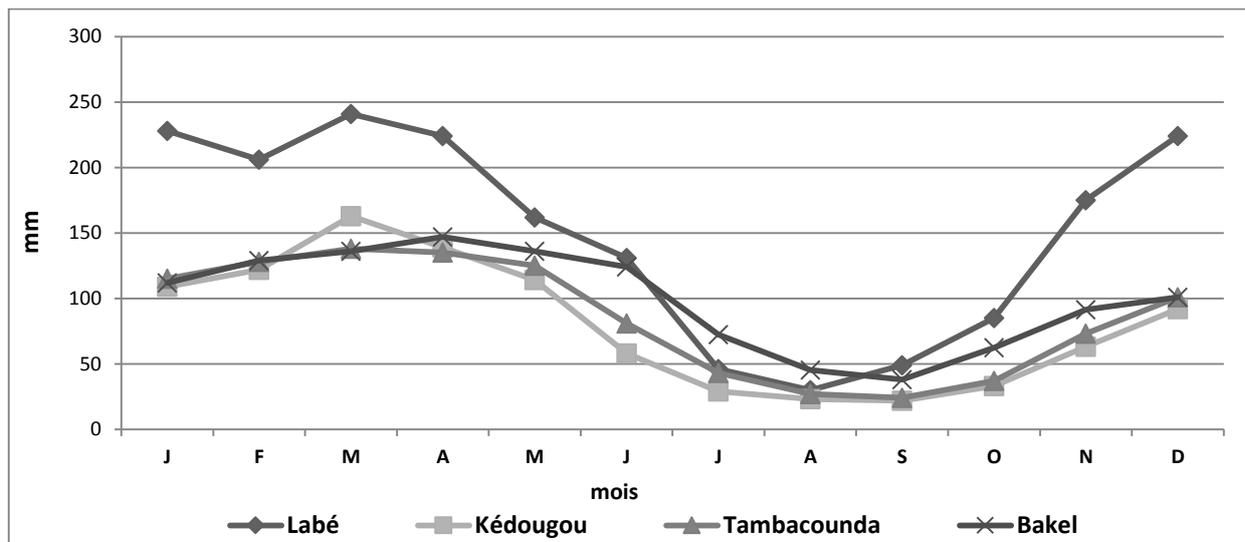


Figure 24 : Courbes de l'évaporation moyenne mensuelle du bassin (période 1970-2007)

L'humidité relative présente une courbe unimodale avec un maximum en période de domination des vents d'Ouest et un minimum en période de domination des vents d'Est (Tableau 40 et Figure 25).

Tableau 40 : Humidité relative mensuelle à Labé (1970-2000), Kédougou (1968-2007), Tambacounda (1951-2007) et Bakel (1983-2004)

	Labé 1950-2000			Kédougou 1968-2007			Tambacounda 1951-2007			Bakel 1983-2004		
	UX	UN	UM	UX	UN	UM	UX	UN	UM	UX	UN	UM
J	76	21	49	46	14	30	45	14	29	41,4	19,8	30,6
F	73	20	47	44	14	29	42	12	27	36,2	15,6	25,9
M	79	20	50	47	15	31	43	12	28	35,7	14,7	25,2
A	87	27	57	53	19	36	49	14	32	35,8	14,8	25,3
M	95	42	69	67	28	48	59	21	40	44	18,7	31,4
J	98	58	78	87	47	67	80	39	59	66,4	30,7	48,6
J	98	65	82	95	61	78	93	57	75	83,8	47,5	65,6
A	98	68	83	97	64	80	97	64	80	91,3	56,7	74
S	98	64	81	98	60	79	98	62	80	94,7	56,4	75,6
O	98	59	79	96	49	73	96	46	71	86	35,5	60,7
N	96	43	70	87	26	57	83	23	53	60,6	21,2	40,9
D	87	30	59	63	17	40	57	16	36	45,8	19,6	32,7
AN	90	43	67	72	34	53	70	32	51	60,1	29,3	44,7

UX : Humidité maximale, UN : Humidité minimale, UM : Humidité moyenne

Les fortes valeurs de l'évaporation s'accompagnent avec une humidité relative faible.

A Labé (dans le domaine nord guinéen), l'humidité relative maximale connaît ses plus faibles valeurs entre novembre et avril : minimum en janvier 76 % et février avec 73 % et ses plus fortes valeurs entre juin et août avec 98 %. La moyenne annuelle est de 90,3 %. L'humidité minimale suit la même évolution : maximum en août avec 68 % ; minimum en février : 20 %, la moyenne étant de 43,1 %. La valeur moyenne annuelle est de 66,7 %.

A Kédougou (dans le domaine sud soudanien), l'humidité relative maximale (UX) connaît ses plus faibles valeurs entre janvier et avril : minimum en février : 43,8 % et ses plus fortes valeurs entre mai et octobre : maximum en septembre avec 97,5 %. La moyenne annuelle est de 72,1 %. L'humidité relative minimale (UN) suit la même évolution : maximum en août avec 63,5 % ; minimum en janvier et février : 14.4 %, la moyenne étant de 33.8 % (valeur très faible). La moyenne annuelle est de 53 %.

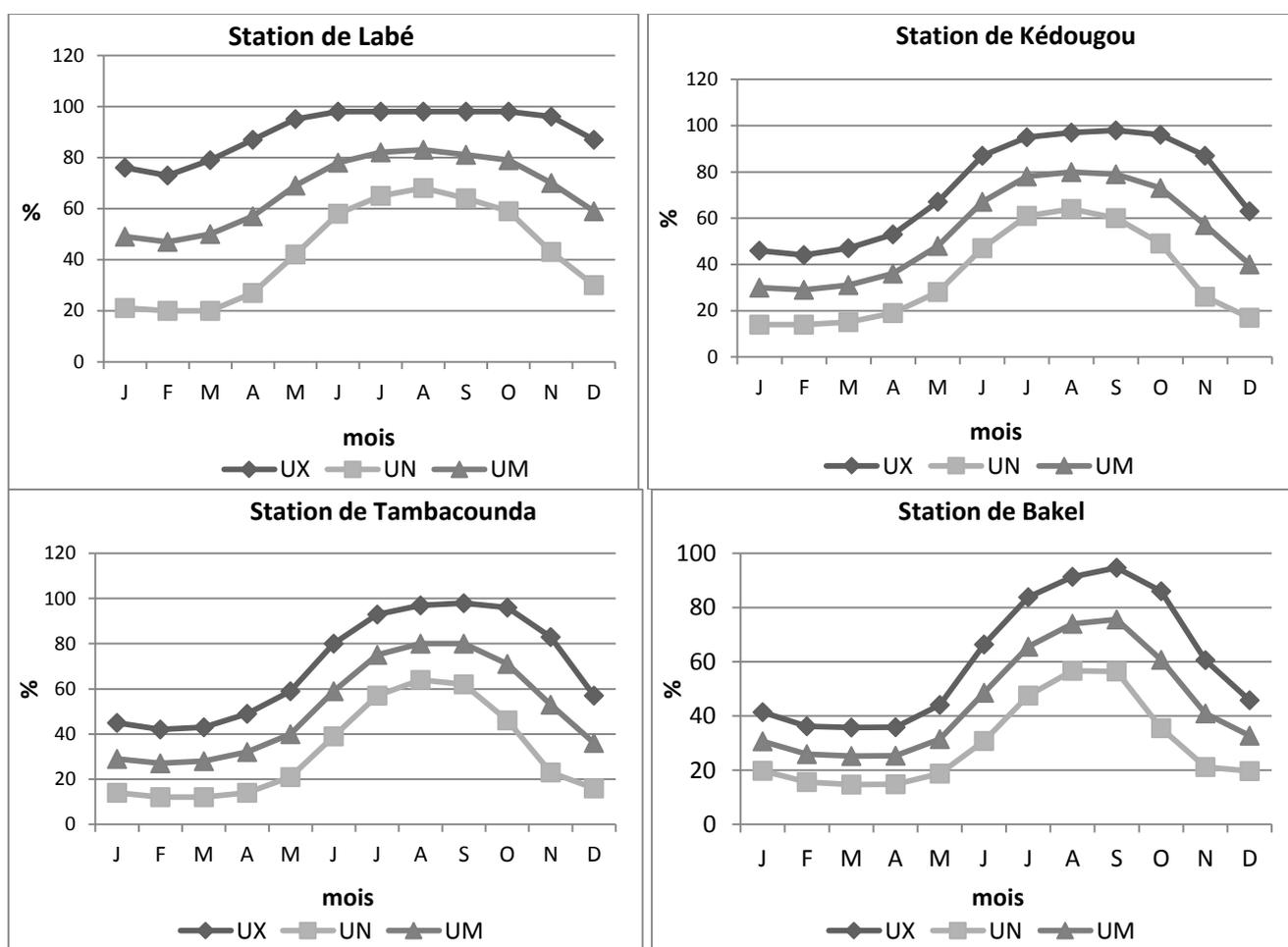


Figure 25 : Courbes de l'humidité relative maximale (UX), minimale (UN) et moyennes (UM) annuelles du bassin (1970-2007)

La station de Tambacounda (dans le domaine nord soudanien) montre la même évolution qu'à la station de Kédougou : maximum maximum en septembre : 98 % ; maximum minimum en février : 42 % ; minimum maximum en août : 64 % ; minimum minimum en février et mars: 12 %. La moyenne annuelle est de 51.% pour une moyenne maximale et minimale respectivement de 70 % et 51 %. Il en est de même pour la station de Bakel avec les maxima en septembre et les minima en mars.

V.4 Les domaines climatiques dans le bassin

L'analyse de ces différents paramètres climatiques permet de diviser le bassin de la Falémé en trois domaines climatiques : le domaine guinéen, le domaine sud soudanien et le domaine nord soudanien (Carte 18).

➤ Dans le domaine guinéen (station de Labé) :

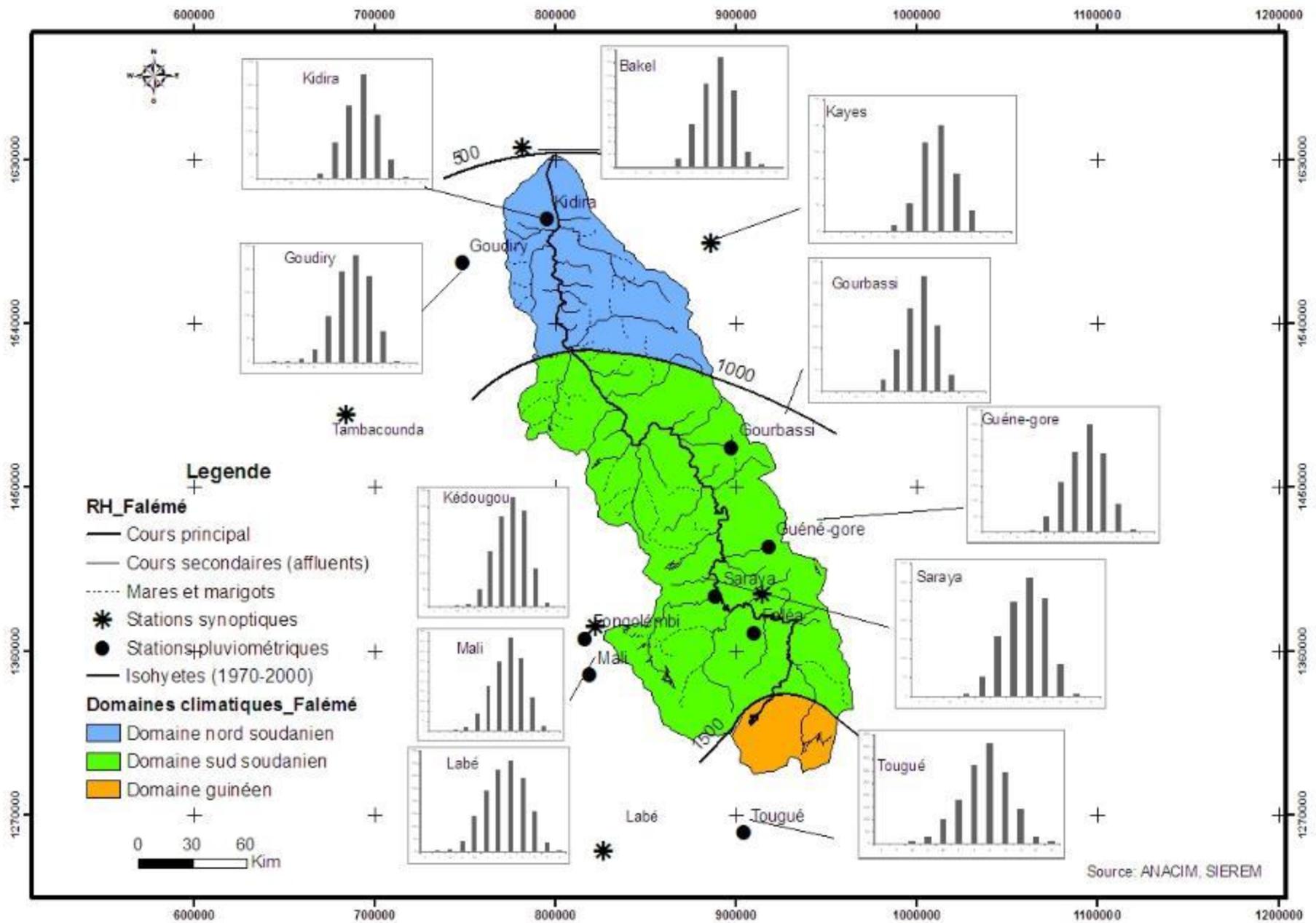
De novembre à mars (5 mois), les vents d'Est sont dominants et sont accompagnés de températures élevées (TX : 32 °C, TN : 15,8°C et TM : 24,2°C en mars) : il s'agit de L'alizé continental ou Harmattan, un vent chaud avec des vitesses élevées (2,9 m/s en janvier et février). L'insolation enregistre son maximum en mars : 274 h. Ces fortes valeurs s'accompagnent de faibles valeurs d'humidité relative (UX =42% en février et UN=13 % en janvier) et de fortes valeurs d'évaporation (296 mm en mars). Cette période reçoit de faibles précipitations représentant à peine 0,3% des totaux reçus à la station de Labé. C'est la saison non pluvieuse dite « sèche ».

Pour le reste de l'année (d'avril à novembre), on note la domination des vents du quadrant S à O qui sont des vents chauds et humides : il s'agit de la mousson, un vent qui s'accompagne avec des températures moins élevées relativement : TX : 31°C, TN : 21,5°C et de faibles valeurs d'insolation : 202 h au mois d'août. Ces vents d'Ouest s'accompagnent de fortes valeurs d'humidité relative, même le minimum est supérieur à 60%, le maximum étant de 98%. L'essentiel des précipitations se concentre sur cette période avec plus de 99,7% des totaux. C'est la saison pluvieuse dite « hivernage ».

➤ Dans le domaine sud soudanien (station de Kédougou) :

De décembre à avril, les vents dominants sont d'Est avec des températures élevées (TX : 39,7°C, TN : 25,6°C et TM : 31,2°C en avril). Leurs vitesses y sont aussi élevées : 2.3 m/s en mars. L'insolation est élevée avec le maximum en 273 heures en avril, ce qui explique les valeurs faibles de l'humidité relative (UX : 53,% en avril ; UN : 14 % en janvier et février), d'où une augmentation de l'évaporation (163 mm en mars). Les précipitations les plus faibles sont enregistrées pendant cette période (0.3%). C'est la saison non pluvieuse dite « sèche ».

De mai en novembre, les vents d'Ouest du total dominant la circulation avec un quadrant S à O dominant. Les températures (TX : 31.2°C en août ; TN : 19,2°C en novembre), l'évaporation (22 mm en septembre) et l'insolation (192 heures en août) sont faibles pendant cette période. Par contre, l'humidité relative est élevée (UX : 98% en septembre ; UN : 64% en août) et l'essentiel des précipitations s'y concentrent (99,7%). C'est la saison pluvieuse ou « hivernage » et le flux dominant est la mousson.



Carte 18: Situation des isohyètes dans le bassin versant de la Falémé

➤ **Dans le domaine nord soudanien (station de Tambacounda) :**

De novembre à avril, les vents d'Est dominent la circulation et se manifestent par de fortes valeurs de températures (TX : 39,2°C en mars ; TN : 24,5°C en avril ; TM : 30,7°C en mars). L'évaporation enregistre de fortes valeurs (138 mm en mars) de même que l'insolation (415 heures en avril). Les valeurs de l'humidité relative (UX : 42,% en février ; UN : 12 % en février et mars) restent faibles. Les précipitations enregistrées pendant cette période sont aussi très faibles (1.15%). C'est la saison non pluvieuse dite « sèche » et le vent dominant est l'alizé continental.

De mai en octobre, les vents dominants sont d'Ouest et s'accompagnent de températures faibles (TX : 31,5°C en août ; TN : 22,3°C en octobre ; TM : 27,2°C en août). Ces vents de mousson ont de faibles vitesses : 1.5 m/s en septembre et octobre. L'insolation est faible et enregistre un minimum de 273 heures en août alors que l'humidité relative est élevée (UX : 97 % et UN : 64 % au mois d'août) et la diminution de l'évaporation (24 mm en septembre). L'essentiel des précipitations sont enregistrées pendant cette période (98.85%). C'est la saison pluvieuse ou « hivernage ».

Dans les 3 domaines climatiques, deux saisons distinctes sont notées :

➤ **La saison non pluvieuse ou sèche**

Elle est caractérisée par des vents venant du Nord, l'harmattan qui domine la circulation pendant toute la période et impose ses caractéristiques : faible humidité relative, fortes températures. Durant cette période, les seules pluies enregistrées, communément appelées pluies de « Heug », sont de nature très faibles. Elles sont dues aux incursions d'air polaire dans le domaine tropical et peuvent favoriser l'écoulement en diminuant les températures et l'évaporation. Cette saison est de durée variable selon les trois domaines climatiques :

- 4 à 5 mois en domaine guinéen (novembre à mars) ;
- 5 à 6 mois en domaine Sud soudanien (novembre à avril) ;
- 6 à 7 mois en domaine Nord soudanien (novembre à avril).

➤ **La saison pluvieuse ou humide**

Le flux dominant durant cette période est la mousson, vecteur d'humidité précipitable. Sa présence s'accompagne de fortes valeurs de l'humidité et les fortes pluies reçues font diminuer les valeurs de la température et de l'évaporation. Le total reçu diminue du Sud au Nord du bassin. Cette saison a aussi une durée variable selon les domaines climatiques :

- 7 mois en domaine guinéen au sud (avril à octobre) ;
- 6 mois en domaine Sud soudanien (mai à octobre) ;
- et seulement 5 mois en domaine Nord soudanien (juin à octobre).

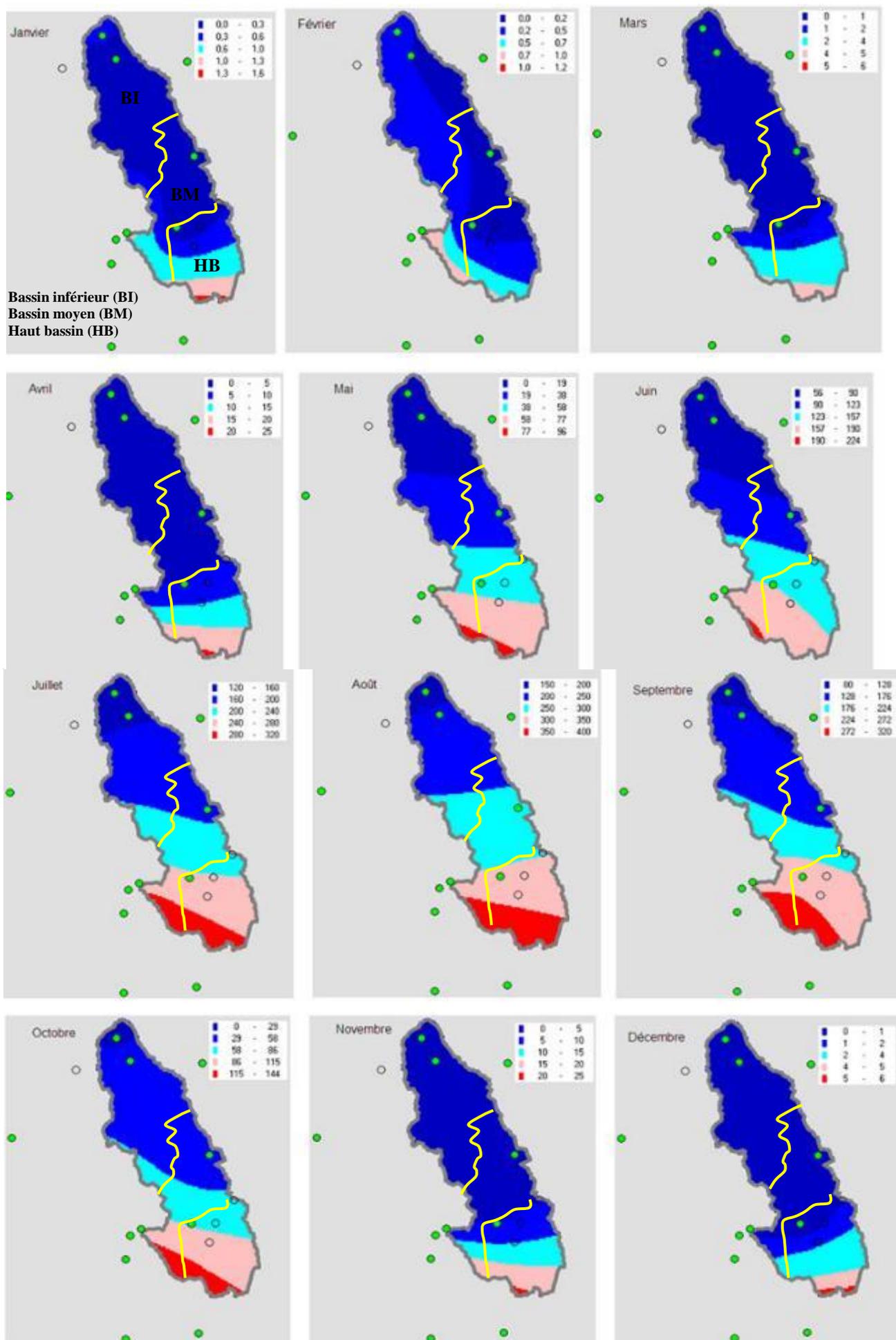


Figure 26 : Répartition spatiale des précipitations moyennes mensuelles sur le bassin.

➤ La distribution spatiale de la pluie mensuelle dans le bassin

Elle suit globalement un gradient S-N dans le bassin selon la répartition des domaines climatiques. La **Figure 26** montre la distribution spatiale de la pluie. Toutefois, l'absence de postes pluviométriques dans le Sud-est du bassin semble biaiser la spatialisation de la pluie. On remarque que :

- De décembre à mars (4 mois), le total des pluies reçues n'atteint nulle part 10 mm. Ces mois marquent la grande saison non pluvieuse, qui affecte tout le bassin. Les rares pluies enregistrées, le sont au Sud du bassin en domaine guinéen du haut bassin et le total reste insignifiant.
- A partir du mois d'avril, les hauteurs de pluies atteignent la tranche située entre 20 et 25 mm dans le haut bassin (où la saison pluvieuse débute relativement plus tôt). Le reste du bassin, à l'exception de l'extrême Nord, connaît des pluies situées entre 5 et 20 mm. C'est partout le début de la saison pluvieuse et les totaux augmentent au mois de mai.
- De juin à Septembre, tout le bassin est en saison pluvieuse. Ces quatre mois sont les plus pluvieux de l'année, avec des hauteurs atteignant 400 mm en août au Sud et situées entre 150 et 200 mm à l'extrême Nord.
- Octobre marque la diminution la plus importante des hauteurs de pluies, et aussi la fin de la saison pluvieuse.

Conclusion partielle

Différents éléments du climat sont analysés dans cette étude : précipitations, direction et vitesse du vent, insolation, température, humidité relative de l'air et évaporation. L'analyse des données climatologiques indique une alternance de périodes sèches (saisons non pluvieuses) et humides (saisons pluvieuses). Les données pluviométriques montrent la subdivision du bassin de la Falémé en trois régimes pluviométriques aux caractéristiques différentes : le régime guinéen, le régime Sud-soudanien et le régime Nord-soudanien. La pluviométrie est caractérisée par une grande variabilité spatio-temporelle et le bassin s'inscrit entre les isohyètes 600 mm au Nord (Sénégal) et 1200 au Sud (Guinée). L'analyse du climat met en évidence la longue période de déficits pluviométriques notés dans le bassin de la Falémé. Ces déficits pluviométriques sont liés à la persistance de la sécheresse qui s'est installée à partir des années 1970. Ce qui a provoqué des ruptures dans les séries de données pluviométriques et une importante baisse des totaux pluviométriques (déficit de l'ordre de 13,9% à 30,5%). La péjoration pluvieuse notée s'accompagne de la hausse des températures, de l'insolation et de l'évaporation, et de la diminution des taux d'humidité relative.

Comme en domaine tropical, le cadre climatique détermine les modalités de l'écoulement fluvial, le climat, à travers son influence sur l'écoulement, constitue un facteur essentiel de l'hydrologie du bassin de la Falémé.

La réponse hydrologique d'un bassin versant dépend de l'influence des facteurs de l'écoulement :

- du climat et surtout des régimes pluviométriques (répartition spatiale et temporelle, intensité et durée) ;
- des facteurs stables liés à la forme du bassin et de ses divers paysages (géologie, sols, végétation, relief).

Ces différents facteurs combinés permettent de subdiviser le bassin en deux régions distinctes : le haut bassin et les bassins moyen et inférieur. Les formations éruptives concernent le haut bassin de la Falémé où se situe la station de Fadougou, les roches métamorphiques occupent le bassin moyen où se trouve la station de Gourbassi, alors que le bassin inférieur où se situe la station de Kidira, est surtout concernée par les roches sédimentaires. La perméabilité faible ou nulle de ces roches (**Tableau 41**) ne favorise pas un écoulement important de nappes capable de soutenir les débits du cours d'eau en période d'étiages.

Tableau 41: Types de roches et leurs caractéristiques de perméabilité dans le bassin de la Falémé (Dione O., 1991)

Formations	Types de roches	Porosité	Perméabilité	% du bassin versant
Sédimentaire	Grès schistes	5 à 30 %	Faible	25 %
Métamorphique	Schistes	0 à 0,8 %	Faible	50 %
	Quartzites	Nulle	Nulle	
Eruptive	Granites	Nulle	Nulle	25 %
	Dolérites	Nulle	Nulle	

VI.1 Dans le haut bassin de la Falémé

Le haut bassin se trouve dans le domaine guinéen entre 12° et 13° de latitude Nord. Dans le cours supérieur, l'influence des quatre paramètres est assez uniforme :

Du point de vue géologique, les formations dominantes sont des roches éruptives (à base de granites, dolérites et gabbros). Ces formations dont les roches sont imperméables, sauf dans les franges d'altérations, présentent une porosité nulle à négligeable et favorisent ainsi un écoulement rapide des eaux de ruissellement. Ainsi, le régime hydrologique de la Falémé y est étroitement lié à la géologie de son bassin. Ce caractère d'imperméabilité est quelques fois limitant dans le processus hydrologique du cours supérieur puisqu'il consacre l'inexistence de nappes capables de soutenir l'écoulement en période d'étiage.

Le relief est sans doute le facteur qui traduit le mieux la partition du bassin entre le cours supérieur aux hautes terres et les cours moyen et inférieur aux régions de plaines. Ainsi, l'influence du relief varie d'une région à l'autre. Dans le haut bassin de la Falémé, le relief est caractérisé par des altitudes

élevées pouvant atteindre 906 m sur le Bowal de Vermini (qui est le point culminant). Ces hauts reliefs du Fouta Djallon et ses contreforts, une région de collines et plateaux (Badiar, Kadé) dont les altitudes varient entre 300 et 500 m, sont les sources des rivières. De même, les différences d'altitudes et les fortes pentes qui en résultent (5‰ pour le Doundi ; 4,91‰ pour le Kouloun Ko) et les différentes formes topographiques contribuent à accélérer la vitesse des drains et modifier les profils en long du cours d'eau. Ces caractères confèrent au cours supérieur de la Falémé un écoulement torrentiel qui sera évoqué plus en détail dans l'analyse hydrologique. Les pentes comme la pluviométrie abondante (Labé : 1612 mm en moyenne de 1923 à 2004) sont ici favorables à un écoulement abondant et rapide.

Trois types de sols y sont recensés : les lithosols, les sols squelettiques et les sols ferralitiques. Partant de leurs caractères pédologiques, il s'avère que les types de sols du haut bassin, par leur texture, ne peuvent avoir une influence significative. Les lithosols et cuirasses qui forment les principaux sols du cours supérieur sont peu profonds et en général peu favorables à la présence d'aquifères, aussi bien superficielles que profondes. Ainsi, leurs caractères pédologiques et leur cuirassement n'assurent qu'un ruissellement rapide et ne favorisent pas les possibilités d'infiltration, d'où une influence hydrologique considérablement réduite. Ce fait est assez paradoxal eu égard au rôle des formations superficielles pour la constitution de nappes qui réalimentent l'écoulement. Il s'y ajoute que les différentes altitudes et les fortes pentes annihilent les possibilités d'infiltration des sols, ce qui est défavorable à l'écoulement.

Dans le haut bassin de la Falémé, les forêts et savanes guinéennes réduites à des reliques, subsistent en lambeaux étagés entre 700 et 800 m d'altitude ou à 1200 m (sur les hauts plateaux latéritiques de Dalaba, Mali et Mali) et exercent une influence non négligeable sur l'écoulement. Cette influence de la végétation est encore très forte dans le secteur du massif du Fouta Djallon, par l'interception des pluies qui apparaît comme un élément réducteur du phénomène hydrologique, mais elle ralentit aussi l'évaporation. Les forêts galeries dans le haut bassin, par leur densité, réduisent fortement l'érosion lors des crues annuelles. Le couvert végétal canalise les drains et facilite leur écoulement. Dans ce secteur, les forêts reliques et les savanes guinéennes ont encore une action efficace par l'interception, la réduction des valeurs de l'évaporation et la protection des berges contre le sapement latéral. Ainsi, son rôle est donc contradictoire car, par le prélèvement de ses racines, la végétation favorise aussi l'évapotranspiration.

Dans le cadre climatique, la subdivision du bassin en domaines climatiques, largement inspirée de la pluviométrie, a permis de retenir certains critères de différenciation. La pluviométrie en régime guinéen est favorable à un écoulement abondant et rapide. Elle est en moyenne de 1900 mm sur le Fouta Djallon. C'est dans ce régime pluviométrique que naissent les principaux cours d'eau qui drainent le bassin. Le fait caractéristique est l'importance du relief qui favorise des précipitations importantes. Pour la période 1923-2004, le régime pluviométrique guinéen qui caractérise le haut

bassin enregistre des quantités de pluies pouvant atteindre 2169 mm à Labé en 1958. Aujourd'hui avec une pluviométrie en déficit croissant (964,4 mm en 2000), il est bien logique que la situation pluviométrique du haut bassin évolue vers un effondrement des ressources en eau. Cela a sans doute des répercussions graves sur l'écoulement du haut bassin d'autant plus que les pluies, seul mode d'alimentation des cours d'eau, sont soumises à une forte ponction, à la fois naturelle et anthropique.

La densité de la population dépasse rarement 6,5 habitants/km² dans le haut bassin du fait de son éloignement et son enclavement. La faiblesse de l'occupation de cet espace par l'homme explique son influence négligeable sur l'écoulement des eaux du bassin. En plus, aucun aménagement de grande envergure capable de perturber le régime des eaux du cours d'eau n'y est encore noté. Excepté les causes anthropiques de la dégradation de la végétation comme le défrichage pour les besoins de l'agriculture, l'exploitation forestière excessive, le surpâturage, l'expansion des aménagements et rejets domestiques, l'exploitation minière intense, les feux de brousse... l'action de l'homme n'a aucune influence capable de perturber les modalités de l'écoulement fluvial.

VI.2 Dans les bassins moyen et inférieur

Les bassins moyen et inférieur de la Falémé situés entre 13° et 14° de latitude Nord, peuvent être confondus dans la même analyse, en ce qui concerne l'influence des facteurs sur l'écoulement.

L'influence de la géologie connaît une décroissance du haut bassin au bassin moyen et inférieur. Elle est composée de roches métamorphiques telles que schistes et quartzites (bassin moyen) et de roches sédimentaires comme les grès et schistes (bassin inférieur) qui sont légèrement plus poreuses et perméables que celles éruptive du haut bassin. Ainsi, la diversité de la structure, jointe à l'existence conditionnée de nappes, fait que la lithologie des bassins moyen et inférieur n'a qu'une importance relative et une influence limitée sur le processus hydrologique, cela en rapport avec la capacité des roches du Continental Terminal (grès, et sables) à permettre l'infiltration du fait de leur perméabilité et possibilité d'aquifères. Ces caractères entraînent une influence inverse de celle du cours supérieur.

Contrairement au haut bassin, dans les bassins moyen et inférieur de la Falémé, l'influence du relief connaît une baisse progressive. Compte tenu des altitudes variables plus modestes, dépassant quelquefois 350 m, le point culminant étant à 516 m (à l'Est de Sabodala) et le point le plus bas à 18 m (à la confluence), l'influence est négligeable, en rapport avec la baisse des altitudes. On distingue : le plateau mandingue (à l'Est du bassin) qui se termine par la falaise de Tambaoura dominant la plaine de la Falémé ; une région de collines, de plateaux tabulaires et de plaine à l'Ouest du bassin et des bas plateaux au Nord et au Nord-ouest. Les altitudes sont généralement plus faibles de même que les pentes tandis que l'érosion éolienne atteint des conditions extrêmes. Ainsi, le cours d'eau diminue d'intensité et seules quelques rares irrégularités du profil (seuils et chutes) perturbent son cours. Ces faibles altitudes et pentes notées et la tendance à la platitude générale ne favorisent pas une influence

hydrologique majeure, le cours d'eau retrouvant son "calme". Ils sont donc défavorables à l'écoulement marqué par une sécheresse avec une pluviométrie moins importante (1230 mm à Kédougou et 521 à Bakel en moyenne de 1950 à 2008).

Du point de vue pédologique, les sols ferrugineux et squelettiques dominent sur les surfaces cuirassées latéritiques, à côté des sols peu évolués d'érosion ou d'apports des régosols, des lithosols sur cuirasse... Le phénomène pédologique le plus déterminant est la latérisation. Les différents sols qui supportent ce phénomène, ont alors une texture qui ne favorise pas une forte infiltration en raison des indurations. Les sols sont alors peu profonds ou peu évolués. Ils sont constitués en majeure partie d'apports et de débris de démantèlement des cuirasses, ce qui est traduit par des caractères hydrogéologiques proches avec des possibilités d'infiltration très nuancées d'un milieu à un autre. Les rares entités capables d'en offrir des possibilités, sont très localisées. De ce fait, l'influence du sol sur l'écoulement est limitée.

Le couvert végétal se modifie aussi du Sud au Nord et devient de plus en plus lâche. Elle se traduit par une influence variable et moindre sur l'écoulement, l'interception n'étant plus efficace. Ainsi sur les bas plateaux et plaines de la moyenne et basse Falémé, le couvert végétal est marqué par un vaste déboisement et une sécheresse. La végétation arbustive, buissonnante et steppique, caractéristique de la zone, ne réalise pas une interception efficace des violentes averses qui la caractérisent. Il en est de même pour l'écoulement qui est temporaire tandis que l'érosion éolienne atteint des conditions extrêmes. La lâcheté du couvert végétal se traduit par une influence réduite sur l'écoulement dans cette partie du bassin.

Sur le plan climatique, le relief ne présente pas d'incidence notable sur la distribution de la pluviométrie. Dans le domaine soudanien du bassin, la saison des pluies, assez concentrée dans le temps, est plus réduite qu'au sud. Elle ne dure que 4 à 6 mois avec des totaux compris entre 500 et 1000 mm. Pour la période 1950-2008, le régime pluviométrique soudanien qui caractérise les bassins moyen et inférieur de la Falémé enregistre des quantités des pluies minimales qui peuvent être très faibles (385,1 mm à Kidira en 1968 ; 433,6 mm à Tambacounda en 1993). La pluviométrie moins importante est un facteur défavorable à l'écoulement marqué ici par la sécheresse. La tendance du déficit croissant noté dans le haut bassin, est beaucoup plus accentuée dans la moyenne et basse Falémé où la péjoration climatique se fait le plus sentir, ce qui entraîne des perturbations de la dynamique de l'écoulement du cours d'eau.

La densité de la population, quoique toujours faible, est plus importante dans les bassins moyen et inférieur qui correspondent aux parties sénégalaise et malienne du bassin. Elle est évaluée à 8 habitants /km² dans la partie malienne et 48 habitants/km² dans la partie sénégalaise, deux régions beaucoup moins enclavées que celle guinéenne du haut bassin. Ces densités de la population, toujours faibles,

ont une influence limitée sur l'écoulement des eaux du bassin. Malgré la présence de quelques aménagements hydrauliques édifiés par les sociétés d'exploitation minière (MDL à Sabodala au Sénégal, Rand Gold à Loulo au Mali), de grands ouvrages ou barrages capables de perturber les modalités de l'écoulement des eaux du cours d'eau n'y existent pas encore. C'est pourquoi, l'action de l'homme n'a pas encore une influence marquée en mesure de perturber les modalités de l'écoulement de la Falémé. Cette influence de l'homme sur l'écoulement des eaux de la Falémé, jadis faible à inexistante, va certainement commencer à se sentir avec la ruée d'entreprise minières et l'augmentation des usages de l'eau pour le lavage de minerais (comme l'or).

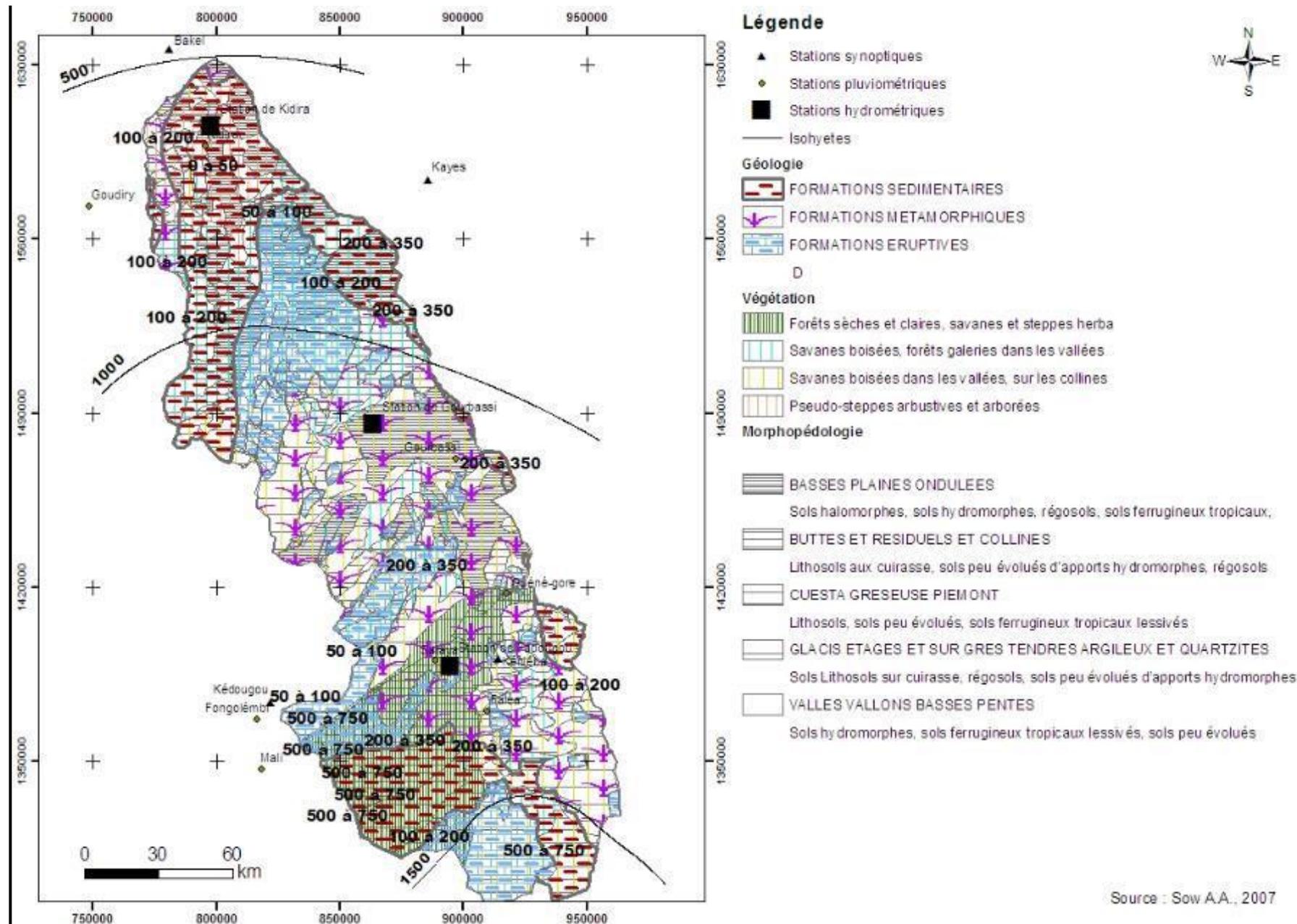
VI.3 Le bilan climatique de l'eau dans le bassin

Le Tableau 42 montre une comparaison entre la pluviométrie et l'évaporation dans le bassin de la Falémé. Le bilan, qui est obtenu par la différence entre les précipitations et l'évaporation est un bloc climatique qui donne une idée sur les mois pluvieux pouvant donner un excédent pour l'écoulement.

Tableau 42 : Bilan mensuel de l'eau par domaine climatique dans le bassin

Descripteurs	Domaine guinéen			Domaine Sud soudanien			Domaine Nord soudanien					
	Labé (1921-2004)			Kédougou (1950-2008)			Tambacounda (1950-2008)			Bakel (1950-2008)		
	Pmm	Evap.	Bilan	Pmm	Evap.	Bilan	Pmm	Evap.	Bilan	Pmm	Evap.	Bilan
J	2	228	-226	0,22	115	-115	0,03	229	-229	0,38	112	-112
F	2,8	206	-203	0,3	128	-128	0,82	254	-253	0,28	129	-129
M	9,4	241	-232	0,86	138	-137	0,69	296	-295	0,46	136	-136
A	42,7	224	-181	3,96	135	-131	5,53	292	-286	0,94	147	-146
M	143	162	-19	52	125	-73	27,3	234	-207	13,7	136	-122
J	242	131	111	167	80,9	86,1	98,7	121	-22,3	65,4	124	-58,6
J	324	46	278	271	43	228	195	63	132	127	72,5	54,5
A	362	30	332	330	27,3	302,7	231	47	184	168	45,3	122,7
S	292	49	243	287	23,8	263,2	185	46	139	117	37,9	79,1
O	161	85	76	114	37	77	66,8	71	-4,2	23,6	62,5	-38,9
N	38,7	175	-136	8,39	73,1	-64,7	1,95	136	-134	4,19	91,4	-87,2
D	7	224	-217	0,39	101	-101	0,32	177	-177	0,38	101	-101
AN	1612	1801	-189	1230	1027	203	808	1966	-1158	521	1194	-673

Dans le bassin, le bilan climatique établi indique les mois qui enregistrent un excédent. Le nombre de mois à excédent varie d'un domaine climatique à l'autre. A la station de Labé, dans le domaine guinéen, cinq mois (juin à octobre) ont connu un excédent. Il en est de même à la station de Kédougou, dans le domaine sud soudanien, où l'excédent est aussi de cinq mois (juin à octobre). Enfin, dans le domaine nord soudanien, seulement trois mois (juillet à septembre) ont enregistré un excédent aux stations de Tambacounda et Bakel.



Carte 19 : Synthèse des facteurs physiques de l'écoulement dans le bassin versant de la Falémé

Conclusion partielle

L'analyse de la **Carte 19** de synthèse des facteurs physiques de l'écoulement (géologie et relief, sol et végétation) et de leurs influences sur l'écoulement, ont permis de subdiviser le bassin en deux régions distinctes :

- Le haut bassin où les quatre facteurs sont favorables à un écoulement abondant et rapide ;
- La moyenne et basse Falémé où l'influence est faible et défavorable à l'écoulement.

Ces différents facteurs combinés, malgré leur influence, sont stables et seul le cadre climatique détermine les modalités de l'écoulement de la Falémé. D'une manière générale, l'ensemble du bassin s'inscrit entre les isohyètes 750 - 900 mm au Nord (Sénégal) et 1500 au Sud (Guinée), A l'intérieur d'elle, la pluviosité varie considérablement, atteignant en moyenne (de 1950 à 2008) 1612 mm à Labé et 1230 mm à Kédougou sur les bordures méridionales et seulement 803 mm à Tambacounda et 521 mm à Bakel au Nord. Ainsi, du Sud au Nord, le bassin de la Falémé traverse le domaine guinéen (haut bassin), le domaine sud soudanien (bassin moyen) et le domaine nord soudanien (bassin inférieur). La distribution de la pluie met en évidence une forte variation spatio-temporelle et surtout le déficit pluviométrique depuis les années 1970, problème majeur pour la gestion durable des ressources en eau du bassin. L'étude de l'écoulement du bassin nous permettra de voir l'impact hydrologique de ces déficits pluviométriques observés dans les différents régimes du bassin.

PARTIE 3 :

L'ÉCOULEMENT ET SA VARIABILITE DANS LE BASSIN DE LA FALEME

La troisième partie de la thèse est divisée en trois chapitres. :

CHAPITRE VII : LE REGIME MOYEN ET SA VARIABILITE

CHAPITRE VIII : LE BILAN DE L'ÉCOULEMENT ET LES DISPONIBILITES EN EAU

CHAPITRE IX : UNE CONTRIBUTION DU MODELE GR2M A L'ETUDE DU
COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN

Les déficits pluviométriques, observés globalement depuis plus de 30 ans en Afrique de l'Ouest, tant dans les zones soudano-sahéliennes que dans les zones tropicales humides, ont eu de graves conséquences sur les ressources en eau de ces régions.

Les caractéristiques de l'écoulement de la Falémé, affluent de rive gauche du Sénégal, sont analysées à partir des données des stations hydrométriques de Fadougou, Gourbassi et Kidira. La caractérisation de l'écoulement et sa variabilité est faite au pas de temps annuel, mensuel et journalier.

Nous analysons les manifestations de l'écoulement et les phénomènes extrêmes que sont les crues et les étiages aux stations de Fadougou, Gourbassi et Kidira.

VII.1 Les régimes fluviaux tropicaux dans le bassin de la Falémé

Le régime hydrologique est la réponse d'un bassin versant aux facteurs physiques stables et aux aléas climatiques. Le bassin de la Falémé s'étend du domaine guinéen au Sud au domaine nord-soudanien au Nord, les trois domaines climatiques ayant des influences diverses. L'année hydrologique, en raison du mode d'alimentation exclusivement pluvial des cours d'eau tropicaux, débute en mai et se termine en avril. Dans le bassin de la Falémé comme dans l'ensemble des bassins fluviaux tropicaux, elle compte huit mois d'une année légale et quatre mois de l'année suivante.

L'étude du régime hydrologique est faite à partir des coefficients mensuels de débit (CMD) qui est le rapport entre le débit d'un mois considéré et le débit moyen annuel. Ces coefficients permettent de définir les périodes de hautes eaux et les périodes de basses eaux. Selon la classification de Pardé (1968)⁶¹, un CMD supérieur ou égal 1 correspond à une période de hautes eaux et un CMD inférieur à 1 est assimilé à une période de basses eaux.

En zone tropicale où l'alimentation est exclusivement pluviale, la longueur des deux périodes qui rythment l'année hydrologique, a permis à Sow A.A. (2007) de définir, suite à une analyse allant de 3° à 14°31, quatre régimes distincts :

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

En associant la latitude et le nombre de mois à CMD supérieur ou égal à 1, Sow A.A. (2007) définit deux régimes fluviaux du bassin de la Falémé. Il s'agit du régime fluvial tropical de transition et du régime fluvial tropical pur (**Carte 20**). Les coefficients mensuels de débits du bassin de la Falémé sont calculés sur la période 1954-2008 et présentés dans le **Tableau 43**.

⁶¹ Pardé M, 1968 : Fleuves et rivières. Paris, A. Colin 245 p.

Tableau 43 : Périodes de hautes et de basses eaux en fonction du coefficient mensuel de débits aux stations du bassin

Descripteurs	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Station de Fadougou	0,15	0,06	0,03	0,01	0,01	0,13	1,07	3,92	3,83	1,83	0,66	0,306	1
	Basses eaux						Hautes eaux				Basses eaux		
Station de Gourbassi	0,08	0,03	0,01	0	0	0,07	0,81	3,58	4,77	2,17	0,53	0,181	1
	Basses eaux						Hautes eaux				Basses eaux		
Station de Kidira	0,07	0,03	0,02	0,01	0	0,09	0,77	3,55	5,07	1,76	0,46	0,177	1
	Basses eaux						Hautes eaux				Basses eaux		

L'analyse des coefficients mensuels de débits du bassin de la Falémé montre deux régimes distincts. Le premier est caractérisé à la station de Fadougou et présente une période de hautes eaux de quatre mois (de juillet à octobre) : il s'agit du régime tropical de transition. Le second régime, déterminé par les stations de Gourbassi et de Kidira, a une période de hautes eaux qui dure trois mois (d'août à octobre) : c'est le régime tropical pur.

VII.1.1 Le régime fluvial tropical de transition et sa variabilité dans le bassin de la Falémé

L'analyse de l'écoulement dans le régime fluvial de transition dans le bassin, passe par l'étude du régime moyen, de sa variabilité et de l'évolution journalière.

VII.1.1.1 Le régime moyen

L'étude du régime fluvial de transition dans le bassin de la Falémé est faite à la station de Fadougou. L'analyse des données du **Tableau 44** montre une phase de montée et une phase de descente des eaux.

➤ **La phase de montée des eaux :**

La période de montée des eaux va de mai à septembre et coïncide avec la crue annuelle. La progression est la suivante (**Figure 27**) :

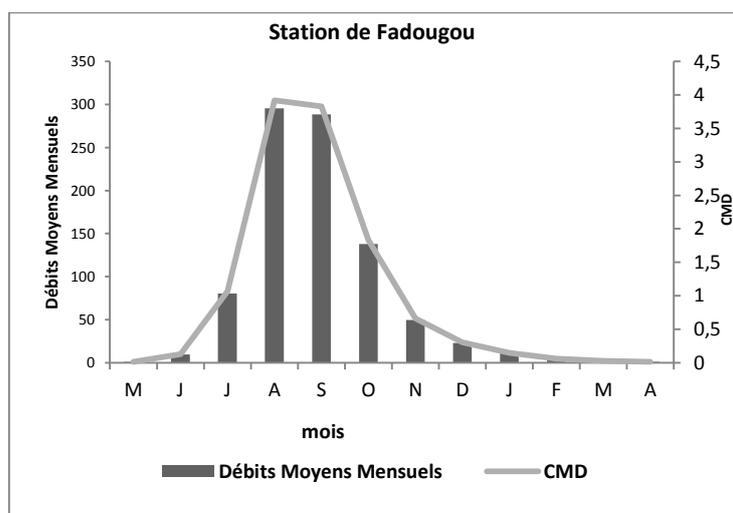


Figure 27 : Hydrogramme de crue évolution mensuelle des débits moyens et des CMD à Fadougou (1954-2007)

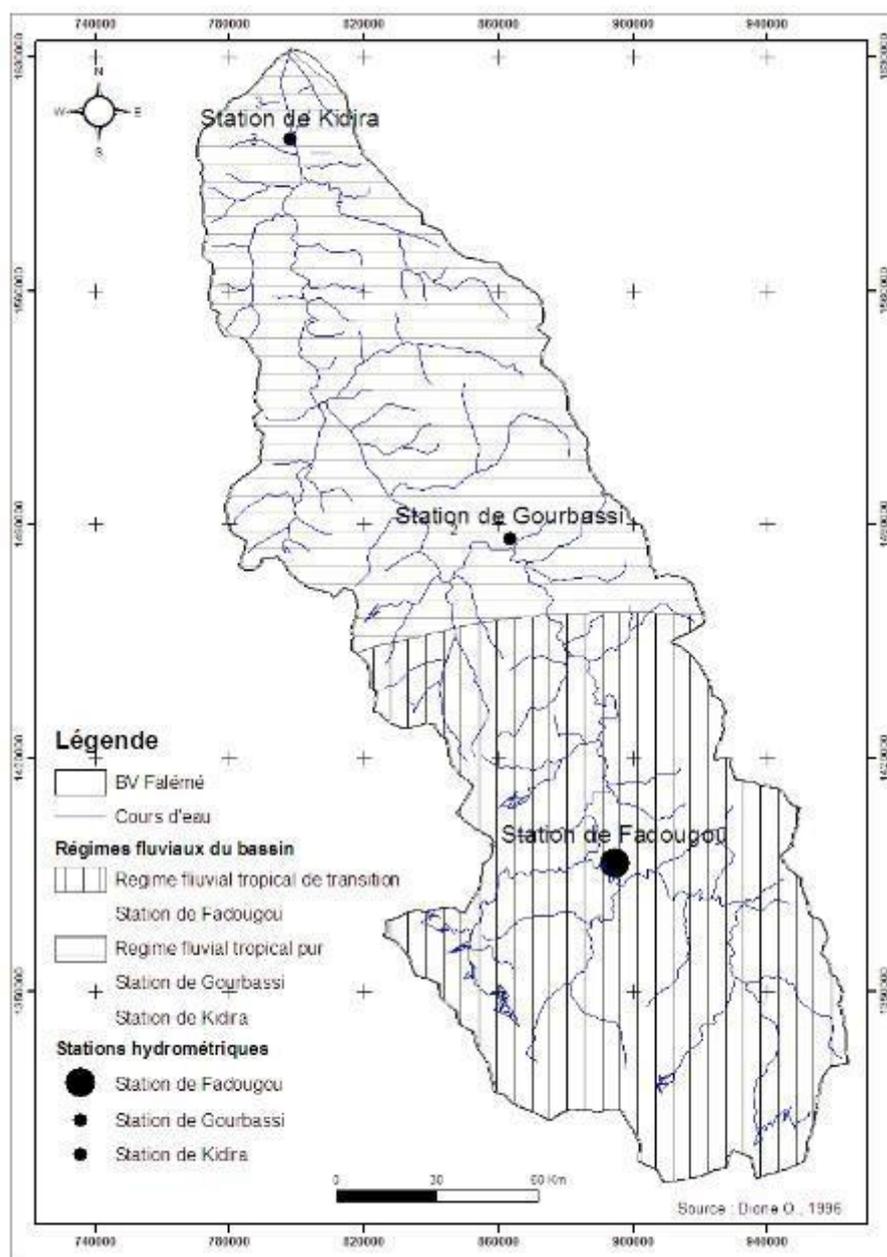
De mai à juin, l'augmentation est de 8,56 m³/s, soit 3 %, ce qui est faible car c'est le début de la saison pluvieuse en domaine guinéen et la période qui correspond à la phase de rétention capillaire.

Tableau 44 : Evolution mensuelle des débits et coefficients mensuels de débits à Fadougou (1954-2007)

Station de Fadougou	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	R
Période	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54		
Lacune	23	20	18	19	20	18	15	19	20	20	22	22		
NB	31	34	36	35	34	36	39	35	34	34	32	34	35	
Moyenne	0,91	9,47	80,4	296	289	138	49,8	23,1	11,0	4,64	2,09	1,00	75,4	
Evolution brute	0,09	8,56	70,9	215	7,06	150	88,2	26,70	12,1	6,38	2,56	1,08		
Evolution en %	0,03	3	24	73	2,40	51,1	30	9,06	4	2	1	0,4		
CMD	0,01	0,13	1,07	3,92	3,83	1,83	0,7	0,31	0,1	0,06	0,5	0,13	1	367

CMD : coefficient mensuel de débit ; R : coefficient d'immodération

De juin à juillet, le débit passant à 70,9 m³/s, soit 24%, est relativement faible en raison du délai de rétention du sol et l'organisation du drainage, ce qui limite la montée des eaux.



Carte 20 : Régime fluvial tropical de transition du bassin de la Falémé à la station de Fadougou

De juillet à août, l'accroissement est de 215 m³/s, soit 73 %. Cet important accroissement est lié aux conditions climatiques favorables. À Labé, la pluviométrie atteint son maximum en août (363 mm)

alors que les températures (25,2°C) et l'évaporation (30 mm) sont minimales. Pour Kédougou, le maximum pluviométrique est atteint en août (309 mm), les températures (31°C) et l'évaporation (47 mm) connaissent leur minimum. Les sols saturés et le relief élevé du haut bassin favorisent le ruissellement. La montée des débits jusqu'au maximum se réalise en trois mois, de juin à août. Le maximum est atteint en août et à partir de ce mois, s'amorce la décroissance des débits.

➤ **La phase de descente des eaux :**

Elle est d'abord faible entre août et septembre (7,06 m³/s, soit 2,40 %), est très brutale de septembre à octobre avec des débits qui diminuent de plus de moitié, passant de 289 m³/s à 138 m³/s, soit une baisse de 150 m³/s qui représente 51,1 % (plus de la moitié du maximum). Cette période de décrue se prolonge d'ailleurs jusqu'à novembre, même si des pluies en octobre peuvent encore relancer les débits et assurer un écoulement important en novembre.

D'octobre à novembre, la décroissance des débits est de 88,2 m³/s, soit 30 %. Cette période correspond à la phase de ressuyage des sols accélérée par le maximum thermique secondaire (34,7°C à Kédougou).

De novembre à décembre, le débit diminue de 26,7 m³/s, soit 9,06 %. A partir de cette période, l'écoulement entre dans la phase de tarissement, ralenti par le soutien des réserves souterraines. De décembre à avril, la diminution des débits est plus soutenue : - 4 %, - 2 % en février, - 1 % en mars et - 0.4 % en avril.

Le régime du bassin de la Falémé à la station de Fadougou a une alimentation exclusivement pluviale avec un maximum en août et un minimum en mai : c'est un régime fluvial unimodal. La période de hautes eaux dure 4 mois. Il est immodéré R=367 et la montée des débits jusqu'au maximum se réalise en trois mois, de juin à août.

VII.1.1.2 La variabilité du régime moyen

Pour étudier la variabilité annuelle de l'écoulement dans le régime fluvial tropical de transition, les valeurs caractéristiques de l'écoulement annuel sont données dans le **Tableau 45**. Le coefficient de variation (CV : 1,01) et l'intervalle de variation entre années extrêmes (IV : 154 m³/s) montrent une grande variabilité annuelle à la station de Fadougou.

Tableau 45 : Valeurs caractéristiques de la variabilité des modules annuels à la station de Fadougou (1954-2007)

Station de Fadougou	Module	Ecart type	CV	Médiane	Quartile inférieur	Quartile supérieur	Année humide	Année sèche	Année moyenne
Débit (m ³ /s)	75,4	43,6	1,01	64,1	41,6	98,5	179	25,2	72,6
Année	1954-2007						1958-59	1984-85	1974-75
Ecart moyen (%)	100			-14,9	-44,8	30,7	137	-66,6	-3,71

Les modules ont été ajustés à différentes lois et celle de Goodrich a présenté le meilleur ajustement par méthode graphique. L'ajustement de la loi de Goodrich (Tableau 46) permet de déterminer les valeurs fréquentielles des débits et le coefficient K3 (qui est le rapport des débits décennaux). K3 qui est de 3,15 montre une très grande irrégularité des modules annuels qui s'ajoute à la grande variabilité.

Tableau 46 : Modules récurrentiels de la Falémé à Fadougou (1954-2007)

Descripteurs	Récurrences sèches					Médiane	Récurrences humides					K3
Fréquence	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	
Récurrence (ans)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	
Fadougou	26,5	27,3	29,3	32,3	37,7	55,4	83,4	102	120	142	158	3.15

L'écart entre le maximum et le minimum de la série est aussi élevé. Il est de 154 m³/s, ce qui représente 137 % du module moyen annuel. Le module annuel de l'année du minimum est déficitaire par rapport au module moyen interannuel de 66 % (Figure 28).

L'évolution annuelle de l'écoulement à Fadougou se fait en dents de scie alternant des années excédentaires et des années déficitaires. Les écarts moyens montrent une grande variabilité annuelle de l'écoulement (Figure 28).

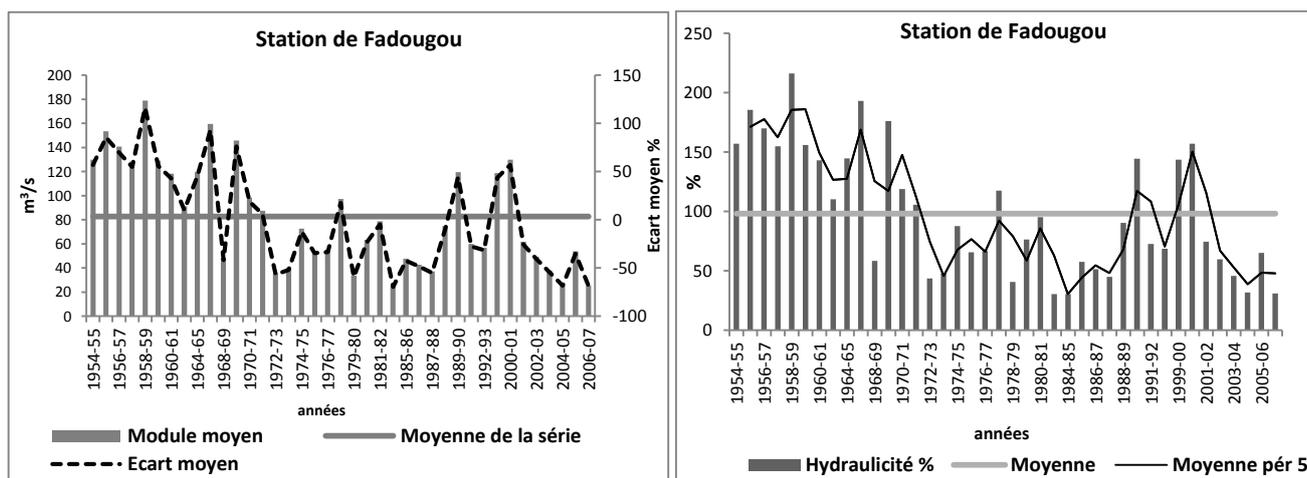


Figure 28 : Evolution des écarts moyens des débits et de l'hydraulicité en % à la station de Fadougou (1954-2007)

La variabilité interannuelle de l'écoulement est perçue aussi avec l'hydraulicité (rapport en % du module de l'année par rapport à la moyenne de la série). La Figure 28 à Fadougou montre que 43,9 %, soit 28 années, ont une hydraulicité supérieure à 100 %, les 56,1% restantes ayant une hydraulicité déficitaire. On remarque que les années à hydraulicité élevée correspondent à des années de bonne pluviosité : l'année humide 1958-59 présente l'hydraulicité la plus élevée (214%) et l'année la plus sèche 1984-85 le plus faible pourcentage (30,4 %).

VII.1.1.3 L'écoulement journalier

L'écoulement journalier en régime fluvial de transition à Fadougou est analysé en année moyenne et en années extrêmes. Le Tableau 47 présente les caractéristiques de l'écoulement journalier de ces trois années.

Tableau 47 : Indicateurs statistiques des débits journaliers à Fadougou (1954-2007)

STATION DE FADOUGOU	Année moyenne	Année du débit moyen le plus élevé (1958-59)	Année du débit moyen le plus faible (1984-85)
Nombre de jours d'écoulement	365	277	298
Lacunes	0	88	67
Q=0	0	0	79
Q<=1l/s.km ²	147	43	178
Moyenne	76,5	179	25,2
Ecart type	111	230	39
Coefficient de variation	1,46	1,29	1,54
Médiane	17,2	86,2	4,21
Quartile inférieur	8,61	43,1	2,10
Quartile supérieur	25,8	129	6,31
Maximum de la série	432	1309	285
Minimum de la série	0,72	2,78	0,00
Ecart entre maximum et minimum	431	1306	285

Q<=1l/s.km² : débit spécifique ; Q=0 : débits nuls

VII.1.1.3.1 L'année moyenne

A l'échelle journalière, l'hydrogramme de crue de l'année moyenne est en forme de "cloche" caractérisé par une seule pointe correspondant au maximum journalier (Figure 29).

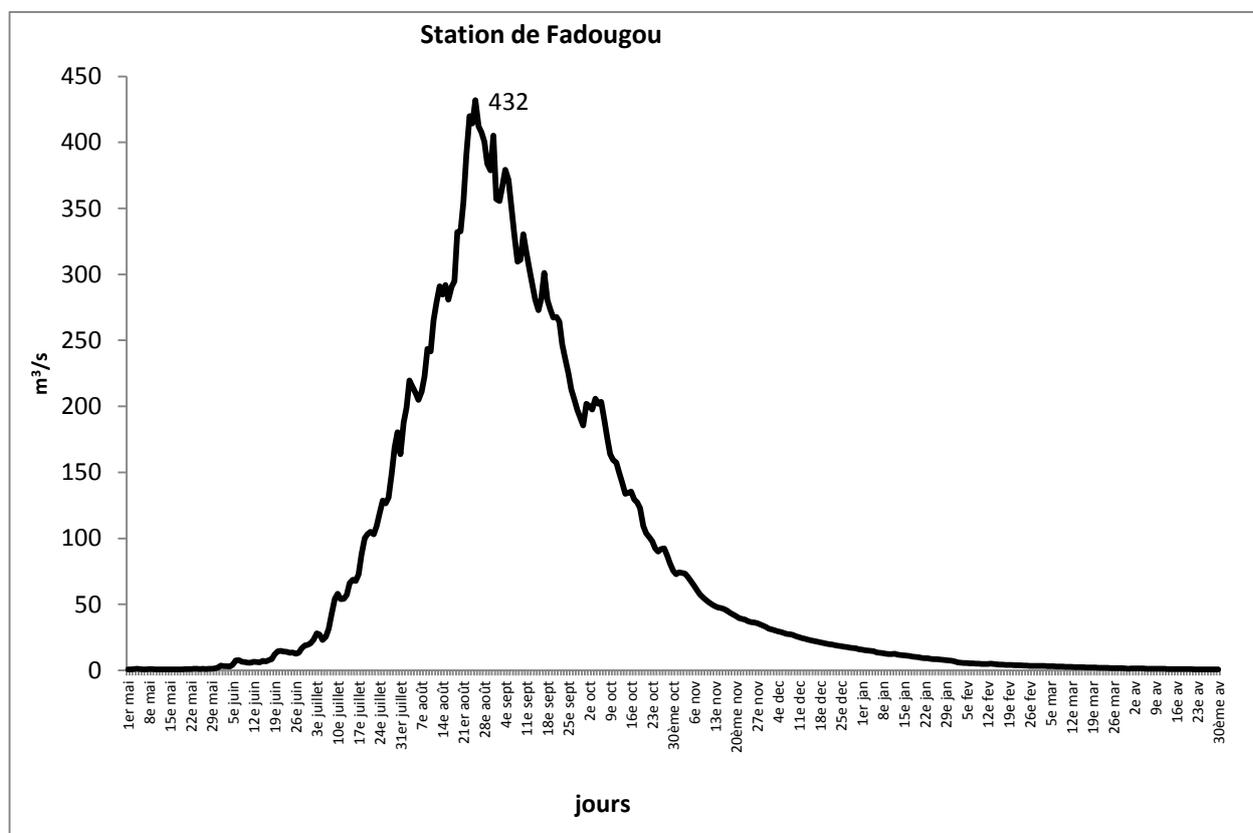


Figure 29 : Hydrogramme des débits journaliers à Fadougou (moyenne de 1954 à 2007)

L'évolution monogénique présente un maximum en août (DMAX : 432 m³/s au 25 août) et un minimum en avril (DMIN : 0,72 m³/s au 29 avril). L'écart entre le maximum et le minimum est de 431

m³/s, ce qui est élevé. Il en est de même pour le coefficient de variation, qui avec 1,46, témoigne de la grande variabilité de l'écoulement journalier. Le débit moyen journalier de l'année moyenne s'établit à 76,5 m³/s. Du minimum au maximum journalier, on compte 117 jours et la montée des eaux se réalise sous forme de "pics" correspondant à ce qu'on appelle "fausses crues" (Sow A.A., 1984, 2007) jusqu'au maximum journalier de l'année. La montée des eaux présente une pente plus redressée que la descente jusqu'au minimum qui se réalise en 248 jours (**Tableau 47**).

Pour chaque année, les débits caractéristiques classés sont analysés :

- Le débit minimum journalier ou étiage absolu de l'année hydrologique **DMIN**, est le débit caractéristique de 365 jours ;
- le débit caractéristique d'étiage (**DCE**) est le débit non dépassé pendant 355 jours de l'année ;
- les débits caractéristiques : **DC1**, **DC3**, **DC6** qui sont les débits respectivement non dépassés pendant 1 mois, 3 mois et 6 mois. Le **DC6** est aussi le débit médian que nous notons médiane ;
- Les débits caractéristiques **DC11** et **DC9** : débits respectivement atteints ou dépassés pendant 1 et 3 mois ;
- Le **DCC** (débit caractéristique de crue) est l'indication du débit atteint ou dépassé pendant 10 jours de l'année ;
- Le débit maximum journalier de l'année noté **DMAX**.

Tableau 48 : Débits caractéristiques classées à Fadougou (1954-2007)

STATION DE FADOUGOU	DMIN	DCE	DC11	DC9	Médiane	DC3	DC1	DCC	DMAX
Année moyenne	0	0,85	1,87	8,97	48,1	198	325	404	432
Année humide 1958-59	-	-	0,33	21,6	94,0	303	550	993	1309
Année sèche 1984-85	0	0	0	0,41	10,5	54	81,5	166	285

A la station de Fadougou, à l'image du DMIN qui s'annule, le DCE (0,85 m³/s), le DC11 (1,87 m³/s) et le DC9 (8,97 m³/s) sont très faibles, alors que le DCC (404 m³/s), le DC1 (325 m³/s) et DC3 (198 m³/s) sont élevés, le débit médian étant de 48,1 m³/s.

VII.1.1.3.2 L'année du débit moyen le plus élevé

L'hydrogramme de l'année 1958-59, année du débit moyen le plus élevé, comprend plusieurs "pics" ou "fausses crues" et une pointe principale : le DMAX (**Figure 30**).

Le maximum est atteint le 26 août avec 1309 m³/s et le minimum le 12 mai avec 2,78 m³/s, soit un écart de 1306 m³/s, ce qui très élevé. Le module moyen journalier de cette année est de 179 m³/s (**Tableau 47**). Du minimum au maximum journalier, on compte 107 jours, soit 10 jours de moins que l'année moyenne et la montée des eaux se réalise avec plusieurs "fausses crues" jusqu'au maximum journalier de l'année. La pente de la montée des eaux est plus redressée que celle de la descente, marquée aussi par différents "pics" jusqu'au minimum, et cela en 160 jours.

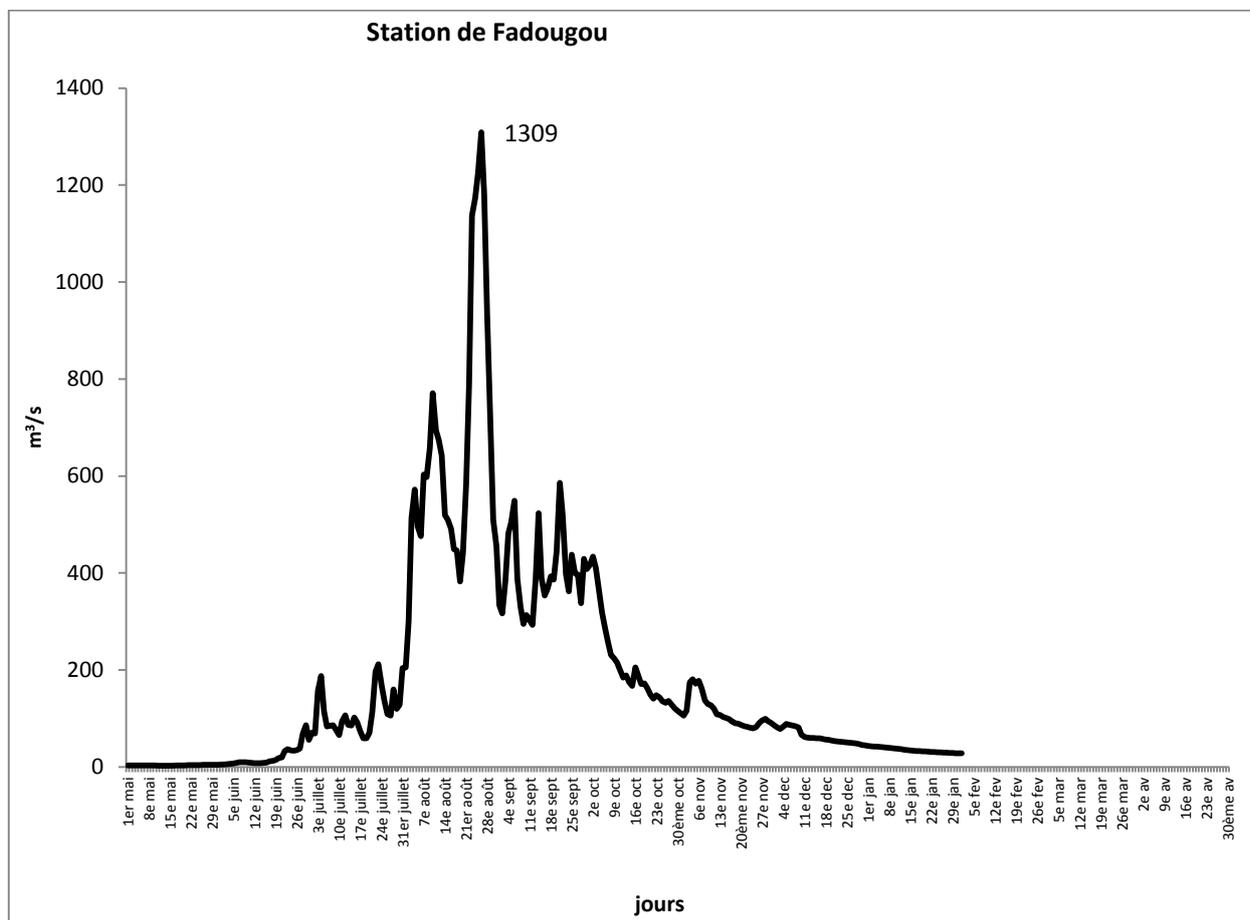


Figure 30 : Hydrogramme journalier de l'année du débit moyen le plus élevé à Fadougou (1954-2007)

Du fait des lacunes, le DCE et le DCE ne sont pas évalués, alors que le DC11 est de $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour le DCC ($993 \text{ m}^3/\text{s}$) et le DC1 ($550 \text{ m}^3/\text{s}$), les valeurs sont élevées. Le débit médian, avec $94 \text{ m}^3/\text{s}$, enregistre un écart de $45,9 \text{ m}^3/\text{s}$ par rapport au débit moyen médian qui est de $48,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tableau 48).

VII.1.1.3.3 L'année du débit moyen le plus faible

L'évolution de l'hydrogramme de l'année du débit moyen le plus faible (1984-85) montre plusieurs "fausses crues" à l'image de l'année du débit moyen le plus élevé. L'écoulement s'annule du 11 février au 30 avril. Le maximum est enregistré le 20 août avec $285 \text{ m}^3/\text{s}$. Le caractère sec de cette année s'explique aussi par un nombre de 178 jours de débits inférieurs à $11 \text{ m}^3/\text{s}$ (ce qui est élevé) sur un total de 298 jours d'écoulement (Tableau 47). Cette année compte 44 jours de montée des eaux caractérisée par de nombreux "pics" jusqu'au maximum journalier de l'année. La descente des eaux, plus lente que la montée, se réalise jusqu'au 10 février (avec $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$) en 219 jours, dernier jour avant l'arrêt de l'écoulement (du 11 février au 30 avril).

Le débit médian est très faible avec $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui fait un écart de $83,5 \text{ m}^3/\text{s}$ au regard du débit moyen médian, soit $-88,8 \%$. Le DC11 s'annule à Fadougou alors que le DCC ($166 \text{ m}^3/\text{s}$), le DC1 ($81,5 \text{ m}^3/\text{s}$) et le DC3 ($54 \text{ m}^3/\text{s}$) sont faibles comparés à ceux de l'année du débit moyen le plus élevé (Tableau 48).

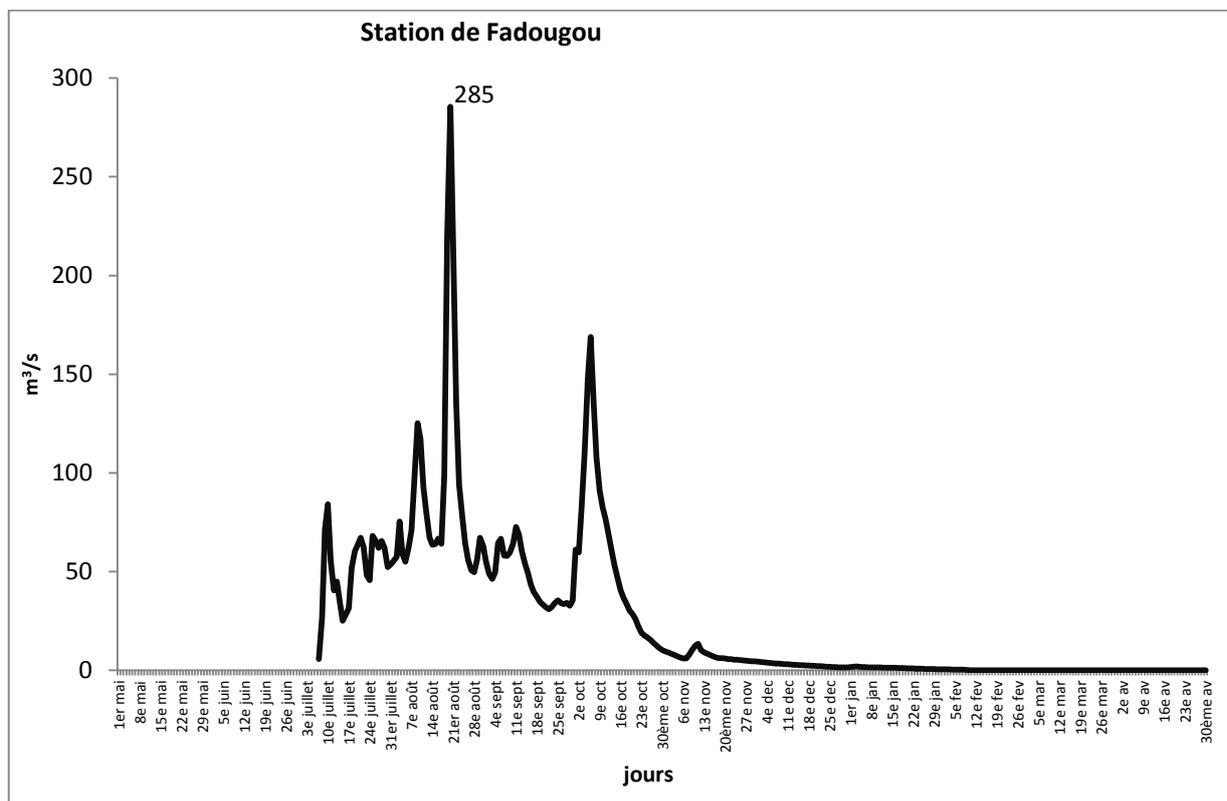


Figure 31 : Hydrogramme journalier de l'année du débit moyen le plus faible à Fadougou (1954-2007)

VII.1.2 Le régime fluvial tropical pur et sa variabilité dans le bassin de la Falémé

Comme à Fadougou, l'écoulement à Gourbassi et Kidira est étudié à travers la variabilité du régime moyen et de l'évolution journalière.

VII.1.2.1 Le régime moyen

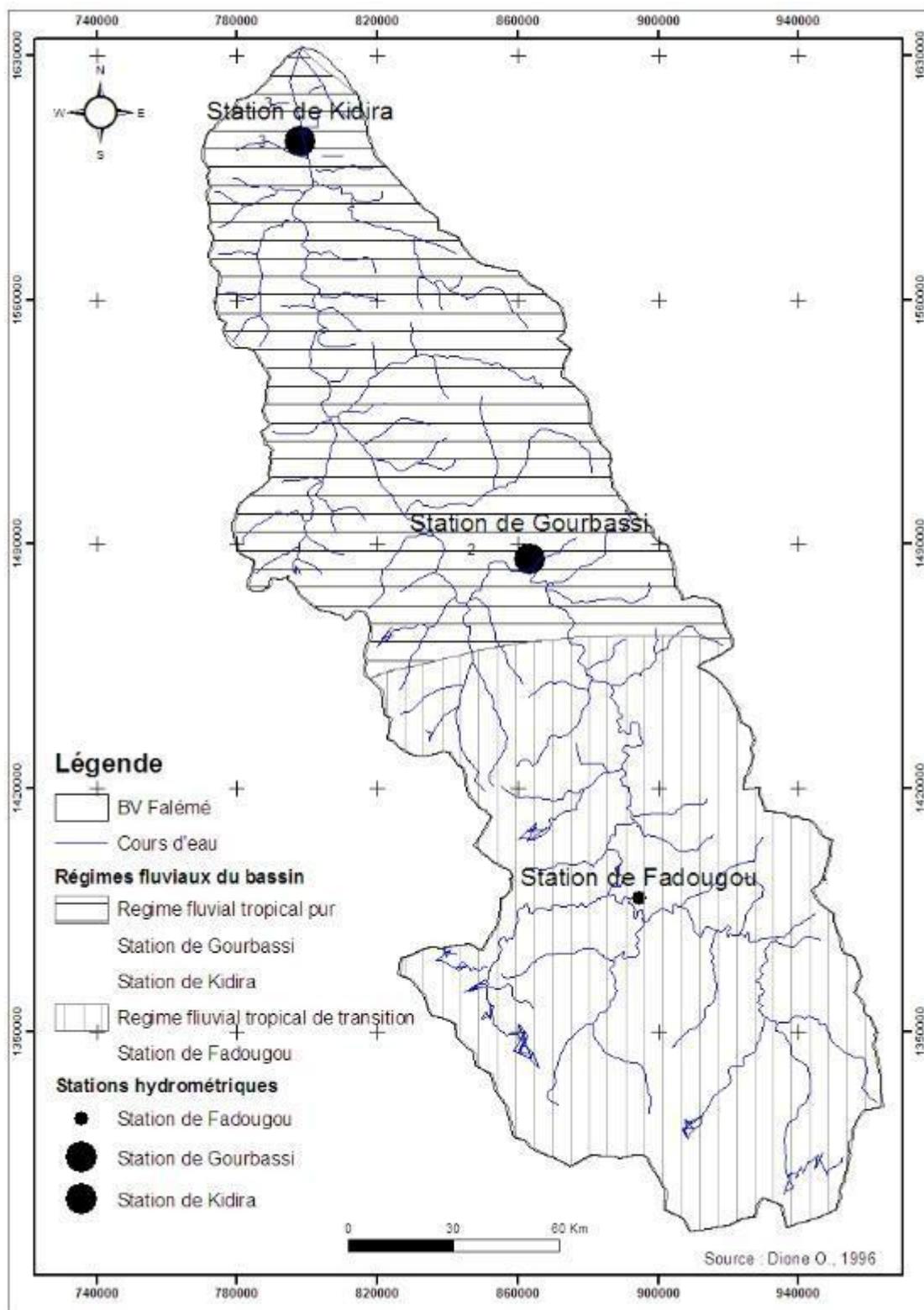
Le régime tropical pur est analysé aux stations de Gourbassi dans le cours moyen et de Kidira dans le cours inférieur. Il combine une phase de montée des eaux de mai à septembre et de descente des eaux qui se prolonge jusqu'en avril (Tableau 49). Le régime tropical pur se caractérise donc par une période de hautes eaux qui dure trois mois et une période de basses eaux qui s'étale sur neuf mois.

Tableau 49 : Evolution mensuelle des débits et coefficients mensuels de débits à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Station de Gourbassi	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	R
Période	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55		
Lacune	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
NB	55	55	55	55	55	55	55	55	54	55	55	55		
Moyenne	0,24	8,19	82,6	371	476	198	53,4	19,6	8,63	3,62	1,25	0,35	102	
Evolution brute	0,11	8	74,4	288	105	278	144	33,8	11	5,00	2,37	0,90		
Evolution en %	0,02	1,70	15,6	60,6	22,1	58,4	30,4	7,11	2,31	1,05	0,50	0,19		
CMD	0,002	0,08	0,80	3,63	4,66	1,94	0,52	0,19	1	0,04	0,01	0,002	1	2330
Station de Kidira	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	R
Période	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55		
Lacune	3	3	2	1	1	1	1	2	16	3	3	3		
NB	52	52	53	54	54	54	54	53	39	52	52	52		
Moyenne	0,30	11,6	95,4	438	633	217	56,4	21,8	8,46	3,93	1,84	0,70	124	
Evolution brute	0,43	11,3	83,8	342	195	416	161	34,6	13,3	4,53	2,08	1,14		
Evolution en %	0,07	1,79	13,2	54,1	31	66	25,5	5,50	2,11	1	0,33	0,18		
CMD	0,002	0,09	0,77	3,53	5,10	1,75	0,45	0,18	0,07	0,03	0,01	0,01	1	2250

➤ **La phase de montée des eaux :**

La montée des eaux va de mai à septembre (**Figure 32**), avec un débit passant de 0,24 m³/s en mai à 476 m³/s en septembre, soit une augmentation brute de 475 m³/s à Gourbassi. A la station de Kidira qui totalise tous les apports du bassin, le débit passe de 0,30 m³/s en mai à 633 m³/s en septembre, soit une augmentation brute de 632 m³/s. Les débits plus élevés de la station de Kidira s'explique par sa position dans le bassin.



Carte 21 : Régime fluvial tropical pur du bassin de la Falémé aux stations de Gourbassi et Kidira

De mai à juin, l'augmentation est de 8 m³/s à Gourbassi, soit 1,70 % et 11,3 m³/s à Kidira, soit 1,80 %. La montée est très lente en raison du début de la saison pluvieuse en domaine sud soudanien qui correspond à la phase de rétention capillaire. La saison des pluies qui a déjà débuté en domaine guinéen envahit progressivement le domaine soudanien. Mais, à Kidira, proche du domaine sahélien, les précipitations sont encore très faibles.

De juin à juillet, le débit passe de 8,19 m³/s à Gourbassi à 82,6, soit 15,6 %. A Kidira, l'augmentation est plus importante : 83,8 %.

De juillet à août, l'accroissement est de 288 m³/s à Gourbassi (60,6 %) et 342 m³/s à Kidira (54 %). Cet accroissement est lié aux conditions climatiques favorables dans tout le bassin. A Kédougou, la pluviométrie atteint son maximum en août (309 mm), les températures (31°C) et l'évaporation (47 mm) restent faibles. A Tambacounda, la pluviométrie enregistre son maximum en août (331,1 mm), les températures (31,5°C) et l'évaporation (27,3 mm) toujours minimales. Pour Bakel, le maximum pluviométrique est atteint en août (186,8 mm), les températures (34°C) et l'évaporation (45,3 mm) sont minimales.

D'août à septembre, la progression des débits est de 105 m³/s à Gourbassi, soit 22,1 % et de 195 m³/s à Kidira, soit 31%. La pointe de crue, intervenant normalement un mois après le maximum pluviométrique, est atteinte en septembre avec 476 et 633 m³/s respectivement à Gourbassi et Kidira.

➤ **La phase de descente des eaux :**

La descente des eaux est très brutale de septembre à octobre, les débits diminuent de plus de la moitié et passant de 476 m³/s à 198 m³/s à Gourbassi, soit une baisse de 278 m³/s représentant 58,4 %. A Kidira, les débits passent de 633 m³/s à 217 m³/s, soit une baisse de 416 m³/s (66 %). Il s'agit de la période de décrue qui se prolonge jusqu'à novembre, les pluies d'octobre ne pouvant relancer les débits et assurer un écoulement important. Novembre a un CMD de 0,52 à Gourbassi et 0,45 à Kidira, c'est la période du tarissement.

D'octobre à novembre, la décroissance des débits est de 144 m³/s à Gourbassi, soit 30,4 % et de 161 m³/s à Kidira, soit 25,5 %. Cette période correspond à la phase de ressuyage des sols, accélérée par le maximum thermique secondaire (34,7°C à Kédougou ; 36,5°C à Tambacounda ; 37,5°C à Bakel).

De novembre à décembre, le débit diminue de 33,8 m³/s à Gourbassi, soit 7,11 % et 34,6 m³/s à Kidira, soit 5,47 %. L'écoulement entre dans la phase de tarissement ralenti par les réserves. La diminution des débits aux deux stations, se poursuit jusqu'en mars, mois du minimum moyen mensuel.

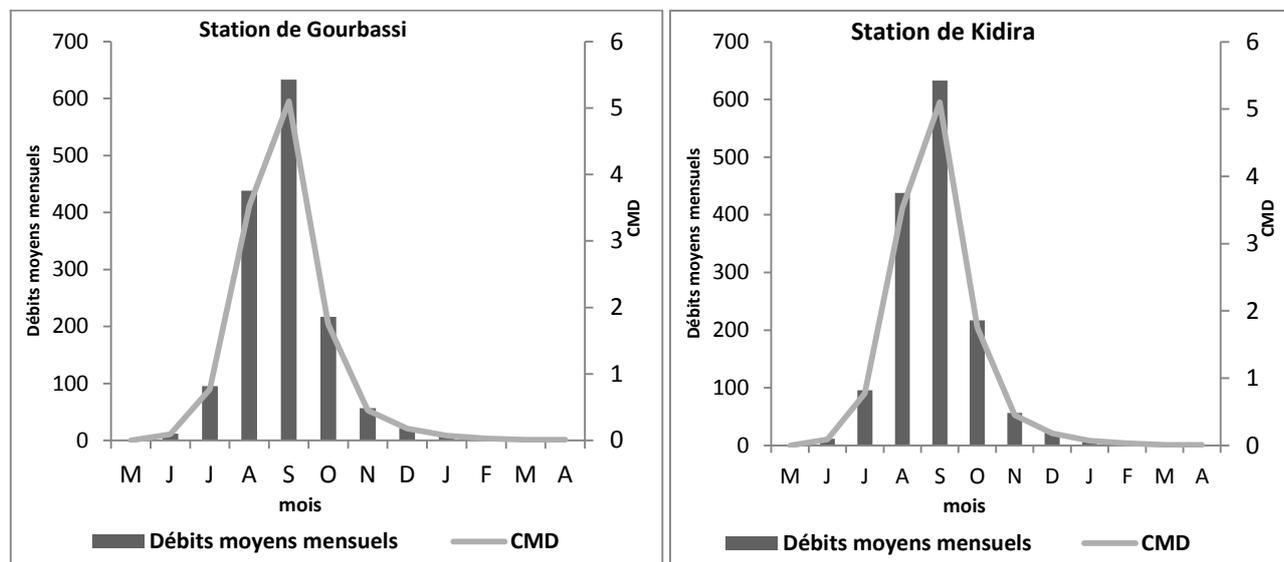


Figure 32 : Evolution mensuelle des débits moyens à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Le régime du bassin versant de la Falémé aux stations de Gourbassi et Kidira se caractérise par un maximum en septembre et un minimum en mai : c'est un régime unimodal. La période de hautes eaux dure trois mois, ce qui en fait un régime tropical pur. Le régime est immodéré (R est très élevé : 2330 à Gourbassi et 2250 à Kidira). La période de hautes eaux dure trois mois, un mois de moins par rapport au régime de transition.

VII.1.2.2 La variabilité du régime moyen

Pour la variabilité annuelle de l'écoulement dans le régime fluvial tropical pur, les valeurs caractéristiques de l'écoulement annuel sont représentées dans le **Tableau 50**. Les coefficients de variation et les intervalles de variation entre extrêmes montrent une grande variabilité annuelle.

Tableau 50 : Valeurs caractéristiques de la variabilité des modules annuels aux stations de Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Station de Gourbassi	Module	Ecart type	CV	Médiane	Quartile inférieur	Quartile supérieur	Année humide	Année sèche	Année moyenne
Débit (m ³ /s)	102	63,3	1,11	85,3	56,1	87	144	20	68
Année	1954-2008						1954-55	1983-84	1976-77
Ecart moyen (%)	100			-16,4	-45	-14	41,2	-80	-33
Station de Kidira	Module	Ecart type	CV	Médiane	Quartile inférieur	Quartile supérieur	Année humide	Année sèche	Année moyenne
Débit (m ³ /s)	124	80,8	0,93	102	64,6	110	293	52	75
Année	1954-2008						1954-55	1983-84	1988-89
Ecart moyen (%)	100			-17,5	-47,9	-12	84,7	-58	-40

L'ajustement de la loi de Goodrich des modules annuels (**Tableau 46**) permet de déterminer les valeurs fréquentielles des débits et le coefficient K3 (qui est le rapport des débits décennaux). K3 qui est de 4,4 à Gourbassi et 4 à Kidira et montre une très grande irrégularité des modules annuels qui s'ajoute à la grande variabilité.

Tableau 51 : Modules récurrentiels de la Falémé à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Descripteurs	Récurrences sèches					Médiane	Récurrences humides					K3
	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2		0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	
Fréquence	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	
Récurrence (ans)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	
Gourbassi	22,1	24,9	31,2	39,3	52,8	90,2	142	173	201	235	259	4,4
Kidira	32,3	34,5	39,6	46,6	59	96,3	152	187	220	260	288	4

Comme la station de Fadougou, la variabilité inter-annuelle de l'écoulement dans le régime tropical pur, analysée aux stations de Kidira et Gourbassi, montre une forte variabilité annuelle (Figure 34).

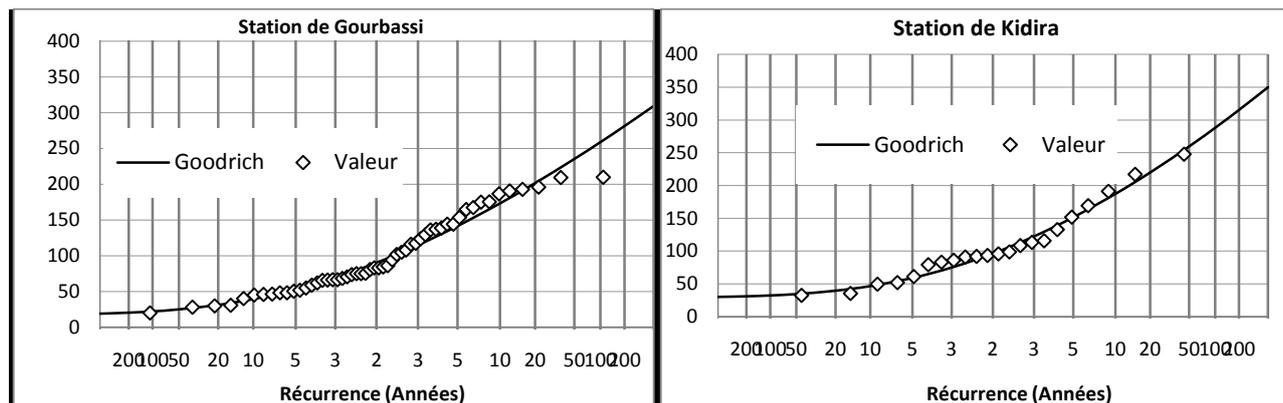


Figure 33 : Distribution statistique des débits moyens annuels de la Falémé à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

A la station de Gourbassi, l'année du module annuel maximal (1954-55) a un écart moyen qui équivaut à 41,2 % et dépasse le module moyen interannuel de 42 m³/s. Par contre, l'année du module annuel minimal a un module moyen de 20 m³/s, soit une diminution de 80 m³/s par rapport au module moyen interannuel. Pour ce qui est de la station de Kidira, l'année du module annuel maximal (1954-55) a un écart moyen de 84,7 % et dépasse donc le module moyen interannuel de 169 m³/s contrairement à l'année du module annuel minimal qui est, par rapport à ce module moyen, de 53 m³/s, soit un écart moyen de 71 m³/s.

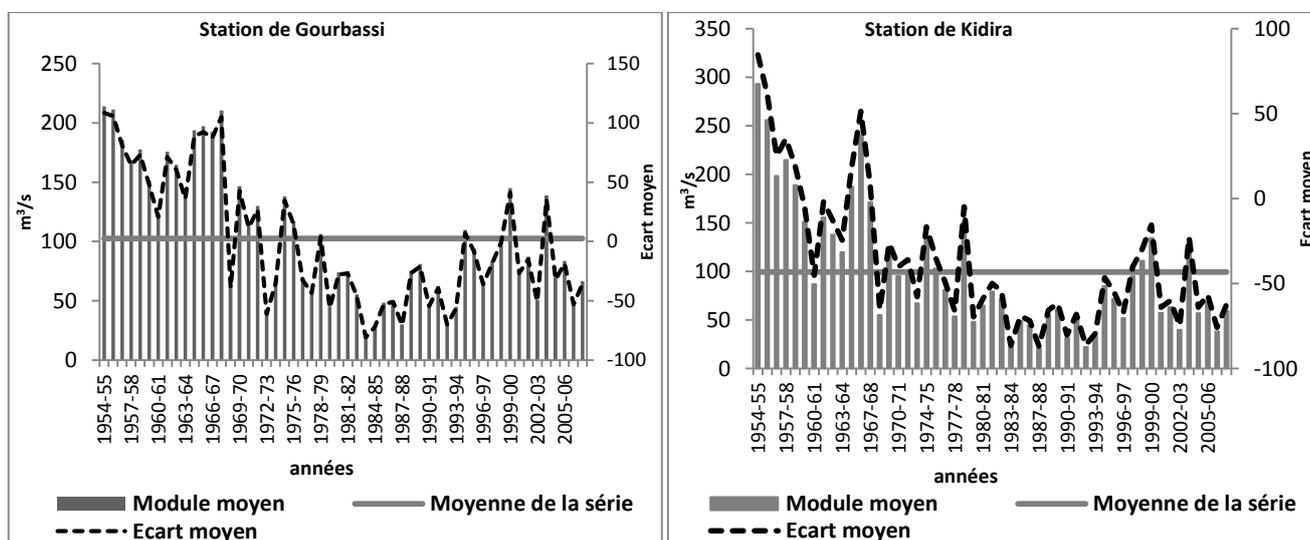


Figure 34 : Evolution des débits moyens annuels à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

La **Figure 35** montre que 47 % des années à Gourbassi et 38 % des années à Kidira ont une hydraulicité supérieure à 100 pour 53 % à Gourbassi et 62 % de Kidira, l'hydraulicité est faible. Toujours, les années à forte hydraulicité correspondent à des années de bonne pluviométrie : l'année humide 1954-55 présente une hydraulicité élevée (208,5 % à Gourbassi et 134 % à Kidira) et l'année la plus sèche 1983 le plus faible pourcentage (19,1 % à Gourbassi et 23,2 % à Kidira).

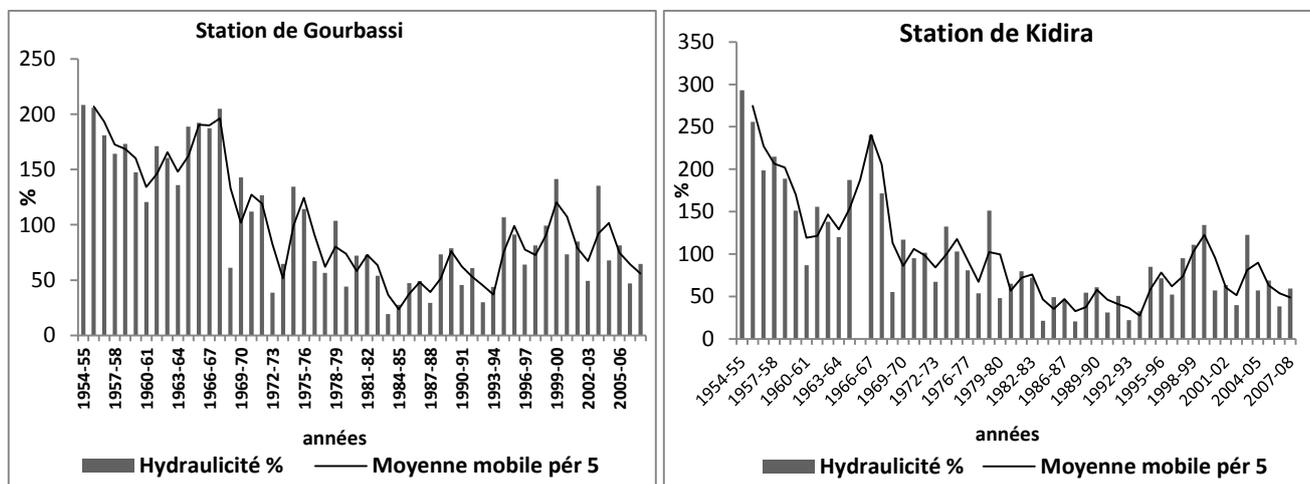


Figure 35 : Hydraulicité en % aux stations de Gourbassi et Kidira (1954-2008)

La Falémé est une rivière non pérenne, essentiellement alimentée par les eaux de pluie et dont l'écoulement se caractérise par une grande irrégularité et variabilité inter-annuelle (**Figure 35**) et même souvent par l'arrêt de l'écoulement.

VII.1.2.3 L'écoulement journalier

Comme à Fadougou, l'écoulement journalier en régime fluvial tropical pur de la Falémé à Gourbassi et Kidira est analysé en année moyenne et en années extrêmes. Le **Tableau 52** présente un ensemble de caractéristiques des débits journaliers de ces trois années.

Tableau 52 : Indicateurs statistiques usuels des débits journaliers à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

STATION DE GOURBASSI	Année moyenne	Année du débit moyen le plus élevé (1954-55)	Année du débit moyen le plus faible (1983-84)	STATION DE KIDIRA	Moyenne	Année du débit moyen le plus élevé (1954-55)	Année du débit moyen le plus faible (1983-84)
Nombre de jours d'écoulement	365	365	228	Nombre de jours d'écoulement	365	345	232
Lacunes	0	0	0	Lacunes	0	20	133
Q=0 (débits nuls)	0	0	137	Q=0 (débits nuls)	0	0	0
Q<=1l/s.km ²	156	96	127	Q<=1l/s.km ²	159	95	98
Moyenne	103	214	19,6	Moyenne	129	281	33,7
Ecart type	162	352	34,1	Ecart type	212	503	39,5
Coefficient de variation	1,58	1,65	1,74	Coefficient de variation	1,65	1,79	1,17
Médiane	15,3	46,3	0,85	Médiane	18,3	64,9	12,0
Quartile inférieur	7,66	23,1	0,42	Quartile inférieur	9,15	32,4	5,98
Quartile supérieur	23,0	69,4	1,27	Quartile supérieur	27,4	97,3	17,9
Maximum de la série	581	1661	148	Maximum de la série	803	2692	153
Minimum de la série	0,15	0,02	0	Minimum de la série	0,21	0,01	0,24
Ecart	581	1661	148	Ecart	803	2692	152

VII.1.2.3.1 L'année moyenne

Dans le régime tropical pur, le débit moyen journalier est de 103 m³/s à Gourbassi et 129 m³/s à Kidira (Tableau 52). L'hydrogramme de crue de l'année moyenne est aussi en forme de "cloche". L'évolution des courbes est monogénique avec un maximum journalier (DMAX) qui est atteint le 6 septembre avec 581 m³/s à Gourbassi, 2 jours avant Kidira où le débit de pointe est de 803 m³/s (le 8 septembre). Le minimum journalier (DMIN) est noté le 22 mai avec 0,15 m³/s à Gourbassi, encore 2 jours avant Kidira où le débit est de 0,21 m³/s (le 24 mai). Les écarts moyens journaliers entre le maximum et le minimum sont relativement élevés (581 m³/s à Gourbassi et 802 m³/s à Kidira). De même, le coefficient de variation est partout élevé : 1,58 à Gourbassi, 1,65 à Kidira et témoigne de la grande variabilité de l'écoulement. Du minimum au maximum journalier, on compte 129 jours à Gourbassi, 3 de moins que Kidira avec 131 jours. La montée des eaux présente une pente plus redressée que la descente avec toutefois moins de "pics". Du maximum journalier au minimum, on compte 236 jours à Gourbassi et 234 jours à Kidira.

Tableau 53 : Débits caractéristiques classés à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

STATION DE GOURBASSI	DMIN	DCE	DC11	DC9	Médiane	DC3	DC1	DCC	DMAX
Année moyenne	0,15	0,21	0,82	7,35	51,4	278	488	565	581
Année humide 1954-55	0,02	0,68	3,67	26	113	514	964	1527	1661
Année sèche 1983-84	0	0	1,54	1,10	11	53,0	82,3	118	148
STATION DE KIDIRA	DMIN	DCE	DC11	DC9	Médiane	DC3	DC1	DCC	DMAX
Moyenne	0,21	0,33	1,25	7,87	58,3	341	643	769	803
Année humide 1954-55	0,01	0,47	2,83	14,3	86,3	611	1504	1810	2692
Année sèche 1983-84	0	4,62	23,74	2,80	14,2	53,4	83,3	121	153

Le DCE (0,23 m³/s à Gourbassi et 0,38 m³/s à Kidira) et le DC9 (7,35 m³/s à Gourbassi et 7,87 m³/s à Kidira) sont faibles. En situation médiane, à partir de la DC6 qui est de 51,4 m³/s à Gourbassi et 58,3 m³/s à Kidira, les débits deviennent très faibles (Tableau 53).

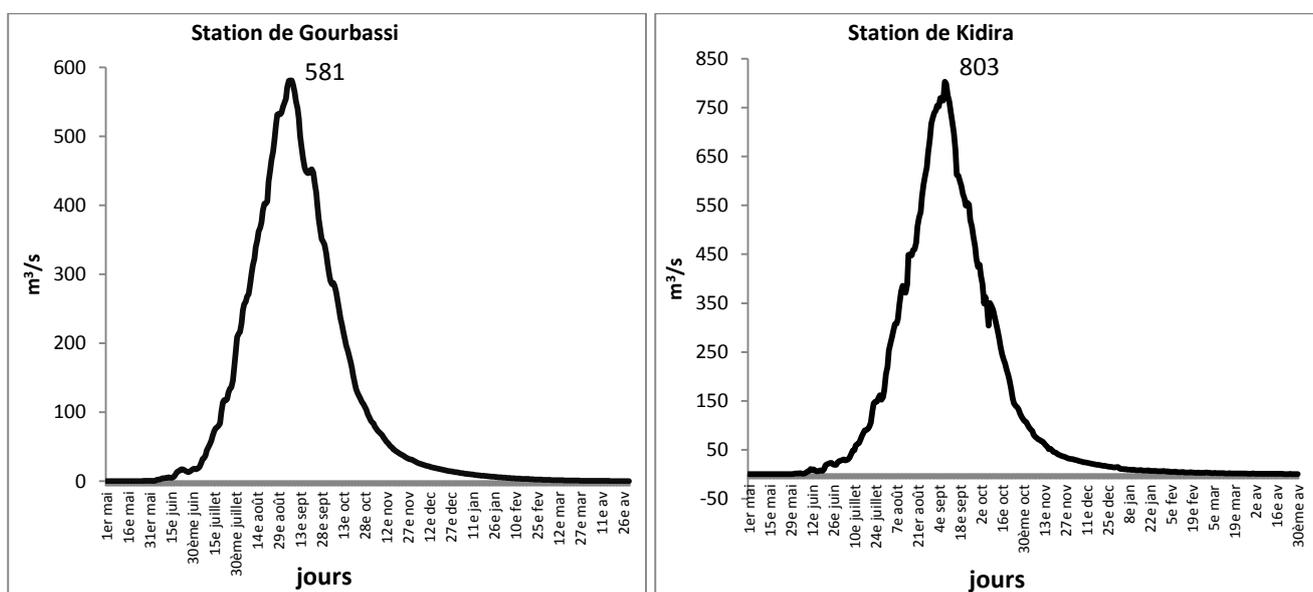


Figure 36 : Hydrogrammes des débits journaliers moyens à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

L'évolution des débits moyens journaliers et des débits caractéristiques classés, assez similaire entre Gourbassi et Kidira, montre, au-delà de sa relative variabilité, la stabilité du régime tropical pur. Ces mêmes paramètres sont utilisés pour l'analyse de l'écoulement en années extrêmes.

VII.1.2.3.2 L'année du débit moyen le plus élevé

Les hydrogrammes de l'année 1954-55, année du débit moyen le plus élevé à Gourbassi et Kidira, ont des courbes irrégulières caractérisées par des "fausses crues" contrairement à la moyenne (**Figure 37**).

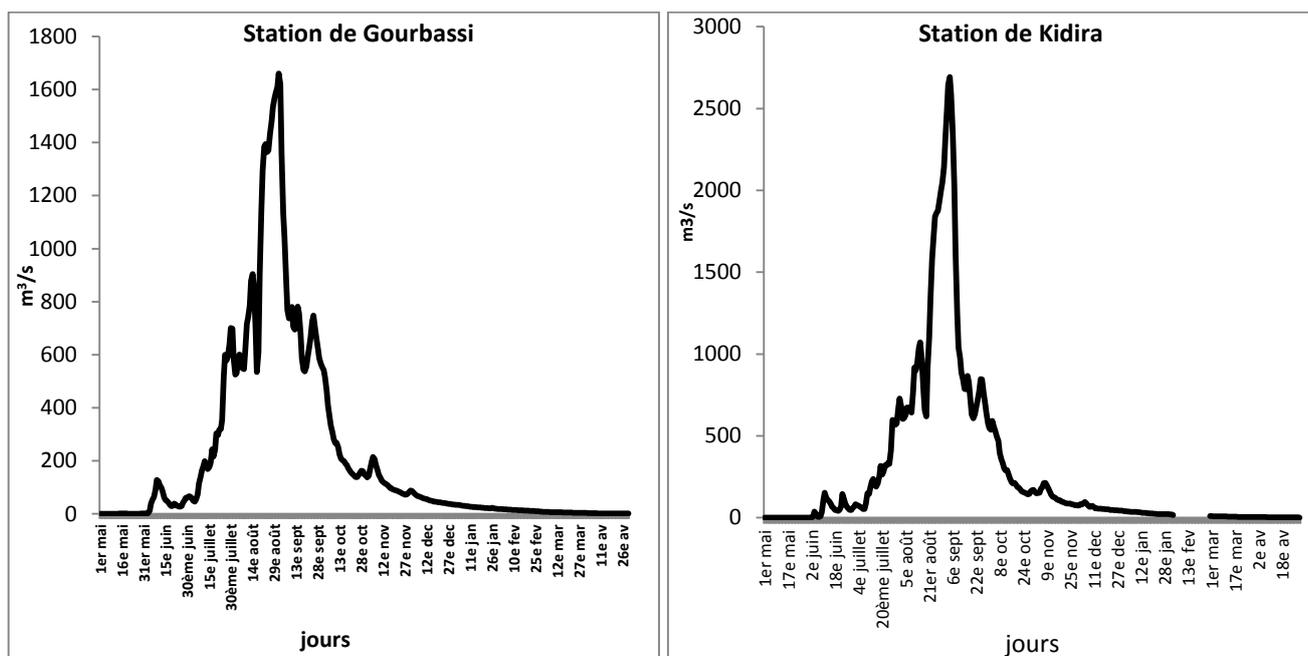


Figure 37 : Hydrogrammes journaliers de l'année du débit moyen le plus élevé à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

A la station de Gourbassi, l'année du débit moyen le plus élevé, avec un module de 214 m³/s, a un écoulement pérenne, le maximum est de 1661 m³/s (le 1 septembre) et le minimum de 0,2 m³/s (le 5 mai), soit un écart de 1661 m³/s (ce qui est élevé). Elle n'enregistre que 96 jours de débits inférieurs à 11/s/km² contre 156 pour l'année moyenne (**Tableau 52**). Pour la station de Kidira, l'écoulement de cette année dure toute l'année. Son débit moyen annuel s'établit à 281 m³/s (hausse de 67 m³/s par rapport à Gourbassi) avec un maximum de 2692 m³/s le 4 septembre et un minimum de 0,01 m³/s le 1 juin (soit 27 jours après Gourbassi).

L'année humide à Kidira compte 95 jours de débits inférieurs à 11/s/km. Du minimum au maximum journalier, on compte 124 jours à Gourbassi et 127 jours à Kidira, soit respectivement 5 et 4 jours de moins que leur année moyenne, et les montées des eaux se réalisent avec des "fausses crues" jusqu'au maximum journalier de l'année.

Pour l'année 1954-55, le DCE (0,90 m³/s à Gourbassi et 0,38 m³/s à Kidira) et le DC11 (0,68 m³/s à Gourbassi et 0,33 m³/s à Kidira) sont faibles, alors que le DCC (1527 m³/s à Gourbassi et 1810 m³/s à Kidira) et le DC1 (964 m³/s à Gourbassi et 1504 m³/s à Kidira) sont très élevés (**Tableau 53**). En

comparaison avec le débit moyen médian, le DC6 de l'année du module le plus élevé est deux fois plus élevé à Gourbassi (avec 113 m³/s, soit un écart de 61,6 m³/s) et à Kidira (avec 123 m³/s, soit un écart de 64,7 m³/s).

VII.1.2.3.3 L'année du débit moyen le plus faible

L'évolution de l'hydrogramme de l'année 1984-85, année du débit moyen le plus faible à Gourbassi et Kidira montre plusieurs "fausses crues" à l'image de l'année humide 1954-55 (Figure 38).

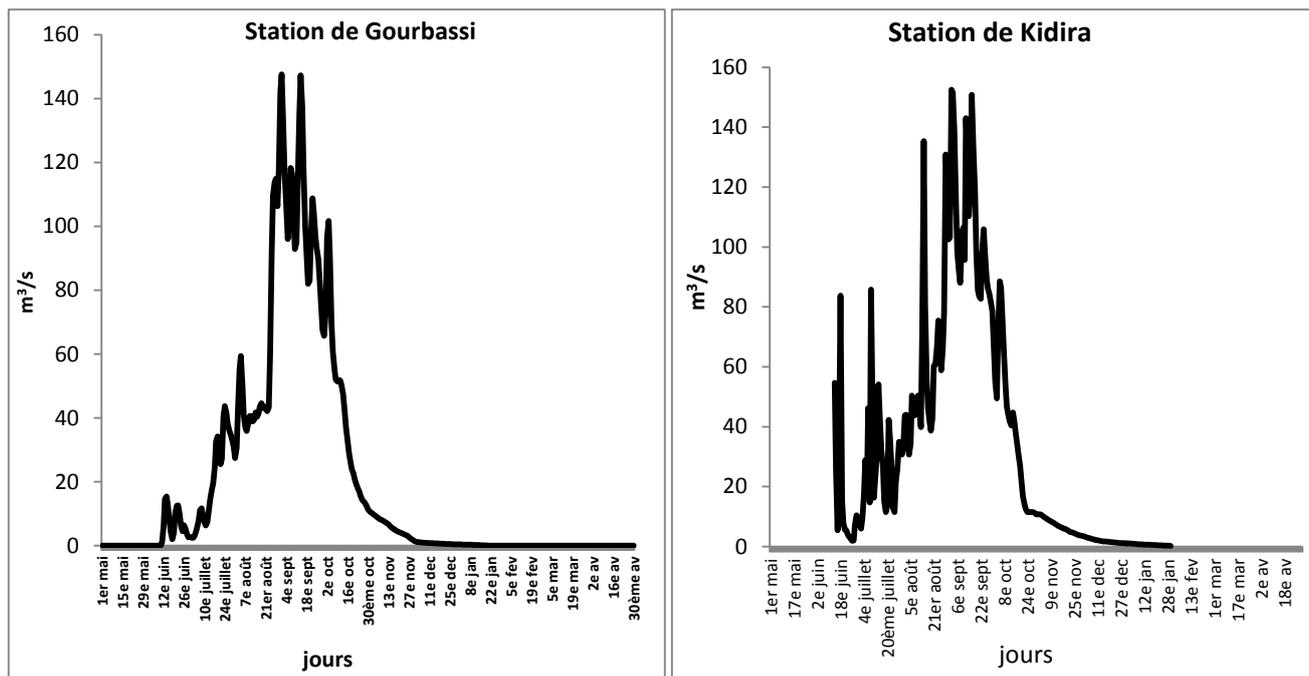


Figure 38 : Hydrogramme journalier de l'année du débit moyen le plus faible à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

A la station de Gourbassi, cette année, avec un module de 19,6 m³/s (soit 194 m³/s de moins que l'année du débit moyen le plus élevé), connaît 228 jours d'écoulement (soit 137 jours de moins), pour un maximum de 148 m³/s atteint le 1 septembre comme en 1954-55 (malgré que l'écart soit de 1513 m³/s) et un minimum qui s'annule à partir du 24 janvier jusqu'à la fin de l'année hydrologique. Pour Kidira, comparée à l'année humide, l'année sèche a un module de 33,7 m³/s (soit un écart de 159 m³/s), 232 jours d'écoulement (soit un écart de 74 jours), un débit maximum de 153 m³/s le 12 septembre (soit un écart de 2539 m³/s) et un débit minimum de 0,24 m³/s le 30 janvier, le reste de l'année étant lacunaire (Tableau 52).

Les valeurs élevées du coefficient de variation : 1,74 à Gourbassi et 1,17 à Kidira, témoignent de la variabilité de l'écoulement. Tout de même, l'écoulement journalier de cette année est plus variable à Gourbassi. On compte un total de 240 jours à débits inférieurs à 11/s/km² à Gourbassi. A Kidira, 98 jours ont un débits inférieurs à 11/s/km².

Du minimum au maximum journalier, on compte 84 jours à Gourbassi et 82 jours à Kidira, soit respectivement 40 et 45 jours de moins que leur année humide. La crue démarre le 10 janvier à Gourbassi avec 0,06 m³/s, 3 jours avant Kidira. Les montées des eaux se réalisent avec des "fausses crues" jusqu'au maximum journalier de l'année, suivant une pente plus redressée comparée à celle de la descente marquée par différents "pics". Cette descente à Gourbassi se fait jusqu'à l'arrêt de l'écoulement le 23 janvier avec 0,001 m³/s en 145 jours (soit 96 jours de moins que l'année du débit moyen le plus élevé), les 97 jours restants de l'année ont des débits nuls. A Kidira, elle se réalise jusqu'à l'arrêt de l'écoulement le 30 janvier avec 0,24 m³/s en 151 jours (soit 87 jours de moins que l'année humide).

En année du débit moyen le plus faible 1983-84, le DCE est nul comme le DMIN et le DC11 très faible : 1,45 m³/s à Gourbassi et 4,62 m³/s à Kidira. Même le DCC (118 m³/s à Gourbassi et 121 m³/s à Kidira) et le DC1 (82,3 m³/s à Gourbassi et 83,3 m³/s à Kidira) sont faibles, comparés à ceux de l'année humide (**Tableau 53**). Le débit médian est de 11 m³/s à Gourbassi et 14,2 m³/s, soit respectivement 21,4 et 24,3 % de leur débit moyen médian.

VII.2 L'analyse de l'écoulement extrême dans le bassin

Les débits de la Falémé présentent d'importantes fluctuations saisonnières dont les conséquences sur l'environnement sont multiples. Dans un contexte où les pressions exercées sur la ressource en eau et les incertitudes liées au changement climatique ne cessent d'augmenter, la connaissance des extrêmes hydrologiques, tels que la crue et l'étiage, constitue un enjeu majeur pour une gestion cohérente de la ressource.

VII.2.1 Les crues

La crue est un concept hydrologique dont l'étude est multidimensionnelle. Certains auteurs considèrent les crues comme les débits correspondant à un certain multiple des modules annuels, alors que pour d'autres, elles sont des débits de fréquence ou de probabilité faible de 1 à 5%, ou alors le plus fort débit observé dans l'année. Sow A. A. (2007) définit ainsi la crue comme : « *la valeur journalière de débit la plus élevée et atteinte chaque année hydrologique, intervenant en domaine tropical à alimentation exclusivement pluviale, durant la période normale des hautes eaux, et au cœur de celle-ci* ».

La crue et les hautes eaux sont différentes par leur fréquence, leur durée et les valeurs de débits écoulés (Frécaut R., 1982⁶²). La crue intervient donc au moment où les conditions favorables pour l'écoulement sont réunies : sols et atmosphère saturés, évaporation et températures faibles, précipitations élevées. Elle est caractérisée par une grande variabilité (**Figure 39**). Le DMAX (débit maximum journalier de l'année) et le DCC (débit caractéristique de crue) sont utilisés pour étudier la

⁶² Frécaut R., 1982 : *Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviale*, Tome 1, 147 p., Publ. Université Nancy

crue. Dans le bassin de la Falémé, l'évolution interannuelle de la crue est irrégulière. Pour mettre en évidence la grande variabilité de la crue dans le bassin, les DMAX des années du débit moyen le plus élevé et du plus faible des stations sont analysées et comparées.

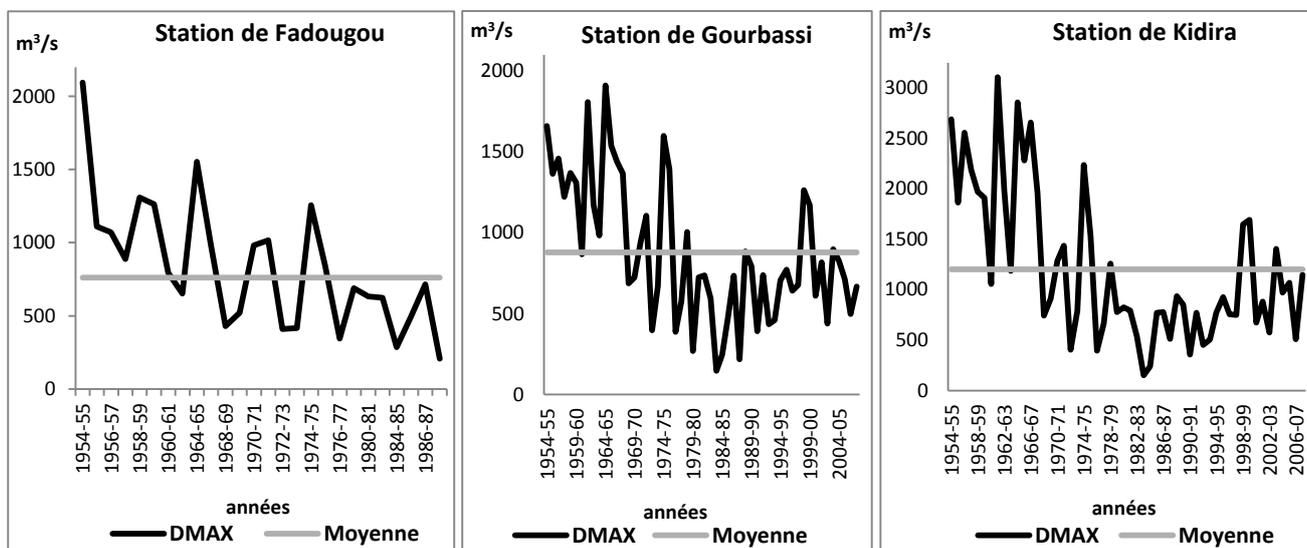


Figure 39 : Evolution des DMAX à Fadougou (1954-2007), Gourbassi et Kidira (1954-2008)

VII.2.1.1 Les crues en régime fluvial tropical de transition

L'analyse des débits maximaux journaliers de l'année (DMAX) en régime fluvial de transition à Fadougou est faite en année moyenne et en années extrêmes. Le Tableau 54 présente les caractéristiques des crues de ces quatre années.

Tableau 54: Caractéristiques de la crue aux années hydrologiques particulières à Fadougou 1954-2007)

STATION DE FADOUGOU	Année Moyenne	1954-55 l'année du DMAX le plus élevé	1958-59 l'année du module annuel le plus élevé	1984-85 l'année du module annuel le plus faible
DMAX en m³/s	719	2095	1309	285
DMAX L/S/km²	77,3	225	141	30,7
Puissance A de la crue	7,46	21,7	13,6	3
Date d'apparition du DMAX		25-août	26-août	20-août
Nombre de jours d'écoulement de l'année	267	312	277	298
Nombre de jours où $Q \geq 1l/s/km^2$	230	291	234	120

VII.2.1.1.1 La crue moyenne

La crue moyenne est étudiée avec les dates d'apparitions du DMAX qui sont concentrées sur les quatre mois de hautes eaux (juillet à octobre). Au cœur de la saison pluvieuse, l'air et les sols sont saturés d'humidité et les températures, l'insolation et l'évaporation sont minimales. Le mois de juillet, bien qu'étant un mois de hautes eaux, n'a jamais enregistré de DMAX.

Tableau 55 : Fréquences des dates d'apparition du DMAX de 1954 à 2007 à Fadougou

Descripteurs	Du 1er au 10 août	Du 11 au 20 août	Du 21 au 31 août	Du 1er au 10 septembre	Du 11 au 20 septembre	Du 21 au 30 septembre	Du 1er au 10 octobre	Du 21 au 31 octobre	Total
Nombre	4	7	12	9	2	1	2	1	38
Fréquence en %	10,5	18,4	31,6	23,7	5,26	2,63	5,26	2,63	100
Somme mensuelle	23			12			3		26
Fréquences mensuelles	60,5			31,6			7,89		100
Caractéristiques	Précoce		Normale			Tardive			

Les dates d'apparition des DMAX varient entre la première décade du mois d'août et la deuxième décade du mois d'octobre (Tableau 55). Le nombre le plus élevé se trouve au mois d'août avec 23 apparitions, soit une fréquence de 60,5 %, suivi du mois de septembre avec 12 apparitions, soit 31,5 %, et du mois d'octobre avec la plus faible fréquence 7,8 %. La troisième décade du mois d'août présente la plus grande fréquence avec 12 apparitions (31,5 %) suivie de la première décade de septembre avec 9 apparitions (23,6 %) et de la deuxième décade d'août avec 7 apparitions (18,4 %). Les autres décades enregistrent de faibles fréquences.

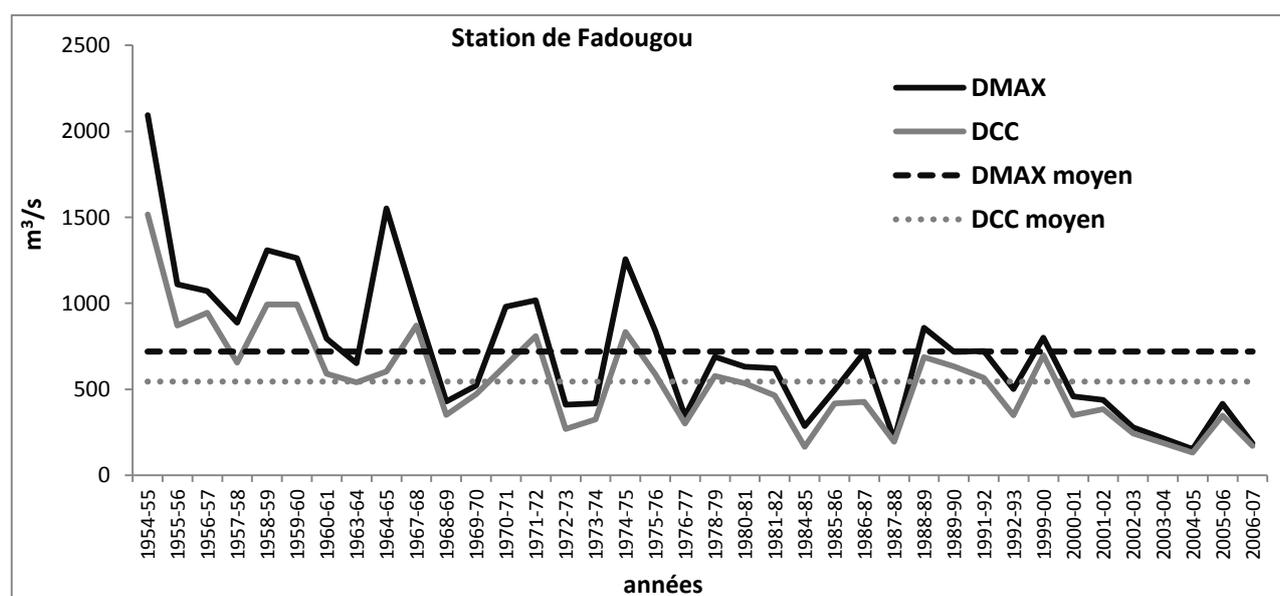


Figure 40 : Evolution de la crue à Fadougou (1954-2007)

D'après la classification de Pardé (1968), chaque fois que le coefficient est inférieur à 60, il est qualifié de médiocre. Toutefois, ce critère, rapporté à l'écoulement des grands cours d'eau africains à régimes tropicaux, donne des valeurs inférieures à 60 et leurs puissances des crues qualifiées de médiocres. C'est pourquoi, dans le bassin de la Falémé, cette classification doit être évaluée avec prudence, d'autant plus que pour le calcul, les débits maximaux journaliers sont utilisés en lieu et place des débits maximaux instantanés. Selon Olivry J.P. (1994)⁶³, cette "médiocrité des crues" est une caractéristique

⁶³ Olivry J. C., (1994) : De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies, Dossier de la Revue de Géographie Alpine No 12, 9p.

générale des cours d'eau du continent africain, aussi bien en Afrique sèche où les précipitations restent modestes et l'aptitude à l'écoulement du bassin versant faible, qu'en Afrique humide où des précipitations plus abondantes ne produisent qu'une onde de crue largement étalée dans le temps du fait de la végétation dense des bassins. Les DMAX connaissent une baisse des valeurs atteintes à partir des années 1970.

Tableau 56 : Caractéristiques des crues à Fadougou (1954-2007)

STATION DE FADOUGOU	DMAX m ³ /s	Puissance A	DMAX L/s.km ²	Hauteur mm	DCC m ³ /s	Débits mensuels maximaux m ³ /s	Module moyen m ³ /s
Moyenne	719	7,46	77,3	98,3	545	324	84,1
Ecart-type	416	4,31	44,8	54,3	292	162	43,4
Coefficient de variation	0,58	0,58	0,58	0,55	0,54	0,5	0,52
Minimum de la série	152	1,58	16,3	30,5	131	60,3	25,2
Ecart en % par rapport à la moyenne	-78,9	-79	-78,9	-69	-75,9	-81,4	-70
Maximum de la série	2095	21,7	225	216	1516	685	179
Ecart en % par rapport à la moyenne	191	191	192	120	178	111	113
Ecart maximum/minimum	1943	20,1	209	186	1385	625	154
Rapport maximum/minimum		13,8		7,08	11,5	11,4	7,09
Rapport maximum/moyenne		2,91		2,19	2,78	2,11	2,13
Rapport minimum/moyenne		0,21		0,3	0,24	0,19	0,3

Le coefficient de puissance de crue se calcule avec le débit instantané. Mais, sur cette étude, par faute de données de débit instantané, le DMAX est utilisé pour le calcul de ce coefficient ($A=Qm3^{-s} / \sqrt{S}$).

Les DMAX connaissent une grande variabilité avec un coefficient de variation élevé (0,58). Le DMAX le plus élevé est enregistré le 25 août 1954-55 et le plus faible le 1 août 2004-05 avec 152 m³/s. L'année du DMAX le plus élevé (1954-55) ne coïncide pas avec l'année au débit moyen le plus élevé (1958-59) et l'année du DMAX le plus faible (2004-05) ne correspond pas avec l'année au débit moyen le plus faible (1984-85). Les rapports maximum/minimum donnent des valeurs élevées avec 13,8. La station de Fadougou compte 16 années à DMAX supérieurs à la moyenne qui est de 719 m³/s. Le DMAX fait 1,3 fois le DCC et 2,3 fois le débit mensuel maximum (Tableau 56).

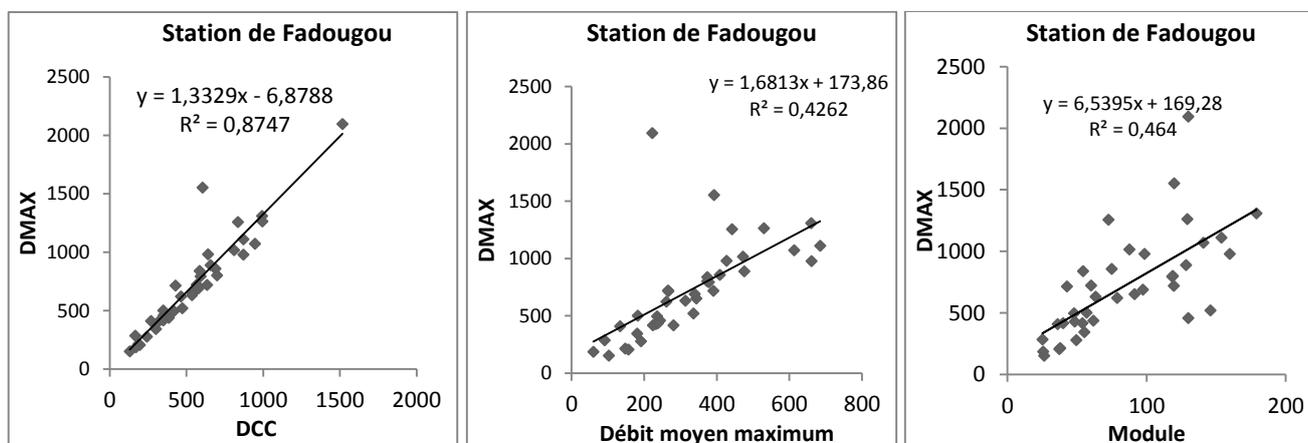


Figure 41 : Exemples de relations entre module, DCC, DMM et DMAX à Fadougou (1954-2007)

Le DMAX est fortement corrélé avec le DCC ($R^2 = 0,87$), alors qu'avec le module ($R^2 = 0,45$) et le débit mensuel maximum ($R^2 = 0,42$), les coefficients de corrélation sont moins significatifs (Figure 41).

VII.2.1.1.2 La crue de l'année du débit moyen le plus élevé

L'évolution de la pluie et de l'écoulement, de l'année du débit moyen le plus élevé, est donnée dans le **Tableau 57**. Cette année 1958-59 a une pluviométrie à Kédougou excédentaire de 19,8 % par rapport à la moyenne avec un total de 1492 mm pour 89 jours de pluies. Le maximum pluviométrique intervient en août (428 mm). La saison pluvieuse démarre en avril (début précoce) et se termine en novembre (fin normale).

Tableau 57 : Ecoulement et pluviométrie mensuels de l'année du débit moyen annuel le plus élevé à Fadougou (1954-2007)

STATION DE FADOUGOU	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	Ecart en %
1958-59 l'année du module annuel le plus élevé	3,44	20,8	112	660	400	207	112	63	34,8	0	0	0	179	138
Evolution brute	3,44	17	91,2	548	260	193	95	49	28	35	0	0		
Evolution en %	0,52	2,63	13,8	83	39,4	29,2	14,4	7,42	4,27	5,27	0	0		
CMD	0	0,12	0,63	3,69	2,24	1,16	0,63	0,35	0,19	0	0	0	1	
Pluviométrie à Kédougou en 1958	112	262	224	428	375	33,7	49,9	0	0	0	0	6,8	1492	19,8

L'année hydrologique 1958-59, bien qu'étant l'année du module le plus élevé, ne compte que trois mois à CMD supérieur à 1, à la station de Fadougou en régime tropical de transition. Le mois d'août enregistre le maximum mensuel avec 660 m³/s et augmente de 548 m³/s et l'année a une hydraulicité de 138 % par rapport au module moyen.

L'année 1958-59 connaît 234 jours de débit \geq à 1l/s.km². L'écoulement commence le 1 mai (2,3 m³/s), s'arrête le 30 janvier (28,5 m³/s) et enregistre son DMAX le 26 août 1958 avec 1309 m³/s. Les valeurs de DCC (993 m³/s) et de DC1 (550 m³/s) sont aussi élevées.

VII.2.1.1.3 La crue de l'année du débit moyen le plus faible

L'année du débit moyen le plus faible 1984-85, année du débit moyen annuel le plus faible, enregistre un déficit pluviométrique de -1,7% par rapport à la moyenne. A Kédougou, le total annuel est de 1223 mm sur 86 jours de pluies. La saison des pluies commence en avril : 4,1 mm et se termine en novembre : 9,2 mm. Le maximum pluviométrique est noté en juillet avec 270 mm (**Tableau 58**).

Tableau 58 : Evolution mensuelle des débits et de la pluie de l'année du débit moyen annuel le plus faible à Fadougou (1954-2007)

STATION DE FADOUGOU	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	Ecart en %
1984-85 l'année du module annuel le plus faible	0			90,4	46,6	54,8	7,13	2,68	1,23	0,13	0	0	25,2	-66
Evolution brute	0	0	0	90,4	43,8	8	48	4	1	1	0	0		
Evolution en %	0	0	0	100,	48,5	8,85	53,1	4,42	1,11	1,11	0	0		
CMD	0	0	0	3,59	1,85	2,18	0,28	0,11	0,05	0	0	0	1	
Pluviométrie à Kédougou en 1984	91,5	272	270	248	211	109	16,9	0	0	0	0	4,1	1223	-1,77

Comme l'année du débit moyen annuel le plus élevé, l'année du débit moyen le plus faible 1984-85 compte trois mois à CMD supérieur à 1. Le DMAX est enregistré au mois d'août avec 90,4 m³/s. Le débit moyen annuel, avec 25,2 m³/s, montre un écart moyen de -66 % par rapport au module moyen annuel.

L'année hydrologique 1984-85 compte au total 146 jours de débits ≥ 1 l/s.km² sur 219 jours. Son écoulement commence le 7 juillet (7,5 m³/s) et s'arrête le 10 février (0,03 m³/s). Le DMAX est atteint le 20 août (apparition normale) avec 285 m³/s, ce qui est faible comparé à celui de l'année du débit moyen le plus élevé. Le DCC (166 m³/s) et le DC1 (81,5 m³/s) sont aussi faibles.

VII.2.1.2 Les crues en régime fluvial tropical pur

La crue dans le régime tropical pur du bassin de la Falémé est étudiée en année moyenne et en années extrêmes. Sur ces quatre années, les caractéristiques des DMAX aux stations de Gourbassi et Kidira sont données dans le **Tableau 59**.

Tableau 59: Caractéristiques des années hydrologiques particulières à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

STATION DE GOURBASSI	Année Moyenne	1964-65 l'année du DMAX le plus élevé	1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	1983-84 l'année du module annuel et du DMAX le plus faible
Nombre de jours d'écoulement	365	353	365	228
Nombre de jours où $Q \geq 1$ l/s/km ²	209	229	269	101
DMAX en m ³ /s	880	1912	1661	148
DMAX L/S/km ²	51,5	112	97,1	8,63
Puissance A de la crue	6,7	14,6	12,7	1,13
Date d'apparition du DMAX		04-sept	01-sept	01-sept
STATION DE KIDIRA	Moyenne	1961-62 du DMAX le plus élevé	1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	1983-84 l'année du module annuel et du DMAX le plus faible
Nombre de jours d'écoulement	365	365	345	232
Nombre de jours où $Q \geq 1$ l/s/km ²	206	231	250	134
DMAX en m ³ /s	1203	3108	2692	152
DMAX L/S/km ²	41,6	107	91,1	5,3
Puissance A de la crue	7,1	18	15,8	1
Date d'apparition du DMAX		8e sept	04 sept	2e sept

VII.2.1.2.1 La crue moyenne

Dans le régime tropical pur, les DMAX apparaissent durant la période des hautes eaux qui est de trois mois (août septembre et octobre). Comme à Fadougou, les DMAX à Gourbassi et Kidira ont des dates d'apparitions très variables (**Tableau 60**). Ils apparaissent entre la première décade du mois d'août et la deuxième décade du mois d'octobre.

A la station de Gourbassi, le nombre et les fréquences d'apparition du DMAX par mois et par décades donnent les résultats suivants :

- Le nombre le plus élevé est noté au mois de septembre avec 30 apparitions (soit 55,6 %), suivi du mois d'août avec 21 apparitions (38,9 %) et le mois d'octobre qui a la fréquence la plus faible (5 apparitions, soit 9,26 %).
- La première décade de septembre a la plus grande fréquence avec 40,7 % (22 apparitions), suivie de la troisième décade du mois d'août avec 13 apparitions (soit 24,1 %) et de la deuxième décade de septembre avec 6 apparitions (soit 11,1 %). Les autres décades du **Tableau 60** enregistrent les fréquences très faibles.

Tableau 60 : Nombre et fréquences des dates d'apparition du DMAX de Gourbassi et Kidira (1954-2008)

GOURBASSI	Du 1er au 10 août	Du 11 au 20 août	Du 21 au 31 août	Du 1er au 10 septembre	Du 11 au 20 septembre	Du 21 au 30 septembre	Du 1er au 10 octobre	Du 11 au 20 octobre	Total
Nombre	3	5	13	22	6	2	3	0	54
Fréquence en %	5,56	9,26	24,1	40,7	11,1	3,7	5,56	0	100
Somme mensuelle	21			30			5		54
Fréquences mensuelles	38,9			55,6			9,26		100
Caractéristiques	précoce		Normale			Tardive			
KIIDIRA	Du 1er au 10 août	Du 11 au 20 août	Du 21 au 31 août	Du 1er au 10 septembre	Du 11 au 20 septembre	Du 21 au 30 septembre	Du 1er au 10 octobre	Du 11 au 20 octobre	Total
Nombre	2	2	16	20	8	3	2	1	54
Fréquence en %	3,7	3,7	29,6	37	14,8	5,56	3,7	1,85	100
Somme mensuelle	20			31			5		54
Fréquences mensuelles	37			57,4			9,26		100
Caractéristiques	précoce		Normale			Tardive			

Pour la station de Kidira, le constat est le même :

- Septembre enregistre le nombre le plus élevé avec 31 apparitions, plus que Gourbassi (soit 57,4 %), suivi du mois d'août avec 20 apparitions (soit 37 %) et du mois d'octobre avec la fréquence la plus faible (5 apparitions, soit 9,26 %).
- La première décade de septembre a aussi la plus grande fréquence 37 % (20 apparitions), suivie de la troisième décade du mois d'août avec 16 apparitions (soit 29,6 %) et de la deuxième décade de septembre avec 8 apparitions, soit 14,8 %. Les fréquences des autres décades sont très faibles.

Au delà de la variabilité de la date d'apparition du DMAX, l'évolution montre le caractère similaire entre les stations de Gourbassi et Kidira, d'où la stabilité de l'évolution de la crue dans le régime tropical pur de la Falémé entre les deux stations.

Le coefficient de variation des crues avec 0,4 à Gourbassi et 0,6 à Kidira, témoigne de la grande variabilité. Le DMAX le plus élevé à Gourbassi est atteint le 04 septembre 1964-65 avec 1912 m³/s, alors que pour Kidira, il est enregistré le 08 septembre 1961-62 avec 3108 m³/s. Le DMAX le plus faible est noté à Gourbassi le 01 septembre 1983-84 avec 148 m³/s, un jour avant Kidira (02 septembre

1983-84) pour un débit de 153 m³/s. L'écart entre le maximum et le minimum des DMAX est de 1764 m³/s à Gourbassi et 2955 m³/s à Kidira.

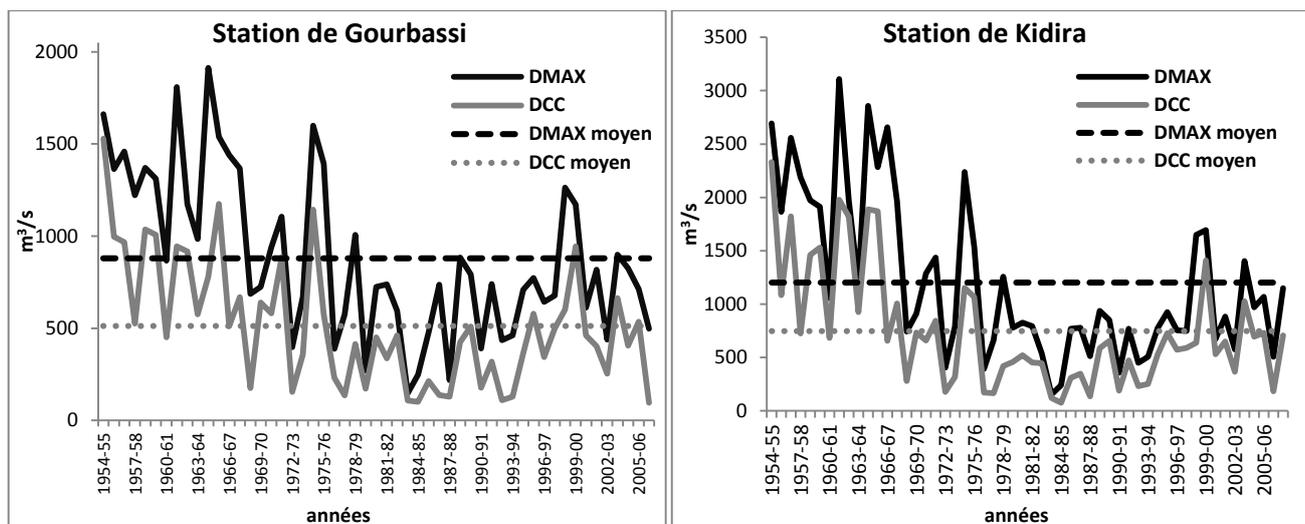


Figure 42 : Evolution comparée des DMAX et DCC à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Les puissances des crues sont très faibles selon la classification de Pardé (qui est inadaptée pour caractériser la puissance de crue en domaine tropical). La faiblesse des puissances des crues s'est accentuée depuis les années 1970 avec la péjoration climatique.

Tableau 61 : Caractéristiques des crues à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

STATION DE GOURBASSI	DMAX m ³ /s	Puissance A	DMAX L/s.km ²	Hauteur mm	DCC m ³ /s	Débites mensuels maximaux m ³ /s	Module moyen m ³ /s
Période (ans)	54	54	54	54	54	54	54
Moyenne	880	6,73	51,5	533	512	512	103
Ecart-type	430	3,29	25,2	172	332	278	55,8
Coefficient de variation	0,49	0,49	0,49	0,32	0,65	0,54	0,54
Minimum de la série	148	1,13	8,63	94	96,1	104	19,6
Ecart en % par rapport à la moyenne	-83	-83	-83	-82	-81	-80	-81
Maximum de la série	1912	14,6	112	908	1527	661	214
Ecart en % par rapport à la moyenne	117	117	117	70,3	199	29,1	109
Ecart maximum/minimum	1764	13,5	103	814	1431	557	194
Rapport maximum/minimum		13		9,66	15,9	6,37	10,9
Rapport maximum/moyenne		2,17		1,7	2,99	1,29	2,09
Rapport minimum/moyenne		0,17		0,18	0,19	0,2	0,19
STATION DE KIDIRA	DMAX m ³ /s	Puissance A	DMAX L/s.km ²	Hauteur mm	DCC m ³ /s	Débites mensuels maximaux m ³ /s	Module moyen m ³ /s
Période (ans)	54	54	54	54	54	54	54
Moyenne	1203	7,08	41,6	696	748	649	159
Ecart-type	741	4,36	25,7	240	549	438	105
Coefficient de variation	0,62	0,62	0,62	0,34	0,73	0,67	0,66
Minimum de la série	153	0,9	5,28	108	77	20,1	32,6
Ecart en % par rapport à la moyenne	-87	-87	-87	-84	-90	-97	-79
Maximum de la série	3108	18,3	108	1167	2330	1025	513
Ecart en % par rapport à la moyenne	158	158	158	67,7	212	58	223
Ecart maximum/minimum	2956	17,4	102	1059	2253	1005	480
Rapport maximum/minimum		20,4		10,8	30,3	50,9	15,7
Rapport maximum/moyenne		2,58		1,68	3,12	1,58	3,23
Rapport minimum/moyenne		0,13		0,16	0,1	0,03	0,21

Pour le calcul du coefficient de puissance de crue, le DMAX est utilisé

Les coefficients de corrélation des indicateurs de crue indiquent des relations acceptables (**Figure 43**). On note une corrélation positive et forte avec des coefficients sur l'intervalle 0,5 et 1. Le coefficient de corrélation entre le DMAX et le débit mensuel maximum est de 0,91 à Gourbassi et 0,73 à Kidira. Avec le module, ce coefficient reste toujours élevée (0,81 à Gourbassi et 0,71 à Kidira), Les relations entre le DMAX et ces différents indicateurs sont généralement plus fortes à Gourbassi qu'à Kidira.

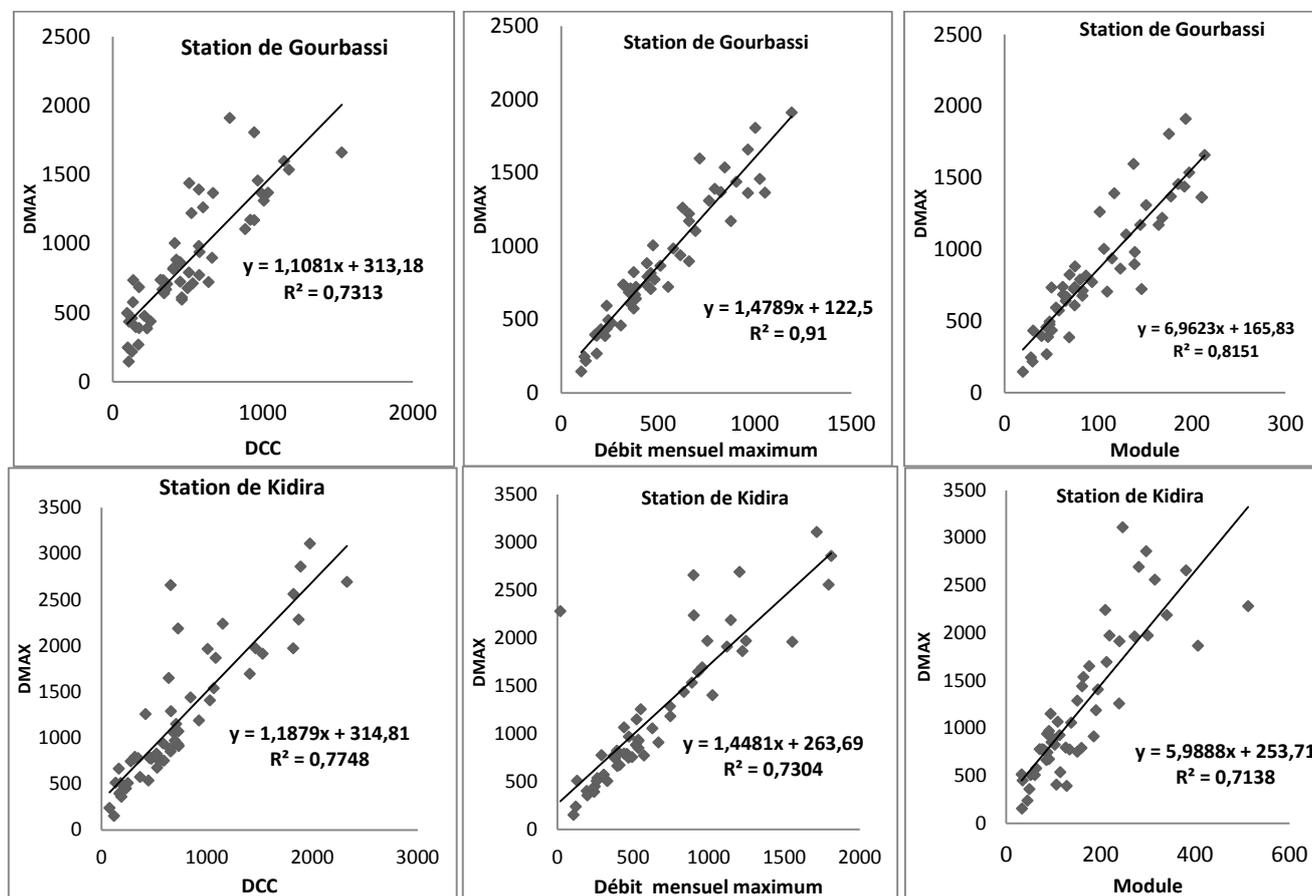


Figure 43 : Exemples de relations entre modules annuels, DCC, DMM et DMAX à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

VII.2.1.2.2 La crue de l'année du débit moyen le plus élevé

L'année du débit moyen le plus élevé 1954-55 à Gourbassi et Kidira enregistre une pluviométrie fortement excédentaire de 73,5 % sur un total annuel de 2180 mm pour 75 jours de pluies. Le maximum pluviométrique est précoce en juillet (501 mm) et la saison pluvieuse démarre en mai et se termine en novembre. A la station pluviométrique de Kidira aussi, la pluie est excédentaire avec un total de 683 mm, soit un écart de 33 mm comparée à la moyenne de 1950 à 2008 (**Tableau 62**).

L'année hydrologique 1954-55 du module le plus élevé a quatre mois de hautes eaux. Le maximum mensuel est enregistré au mois d'août avec 965 m³/s à Gourbassi (DMAX précoce). Pour Kidira, le maximum est enregistré au mois de septembre : 1204 m³/s (apparition normale). Le débit moyen annuel présente l'excédent le plus élevé (123 m³/s à Gourbassi et 169 m³/s à Kidira) par rapport au module moyen annuel.

Tableau 62 : Evolution mensuelle des débits et de la pluie de l'année du débit moyen annuel le plus élevé à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

GOURBASSI	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	Ecart en %
1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	0,52	50,1	276	965	795	250	118	52,5	-	7,07	1,65	0,42	224	123
Evolution brute	0,52	49,6	226	689	170	545	132	65,5	-	7,07	5,42	1,23		
Evolution en %	0,05	5,14	23,4	71,4	17,6	56,5	13,7	6,79	-	0,73	0,56	0,13		
CMD	0	0,3	1,4	5	4,1	1,3	0,6	0,3	0	0	0	0	1	
Pluviométrie à Kédougou en 1954	113	337	501	429	543	138	96,6	0	0	1,9	0	0	2160	73,5
KIDIRA	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	Ecart en %
1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	0,30	60,1	258	1128	1204	290	127	59,9	-	-	-	-	281	169
Evolution brute	0,30	59,8	198	870	76	914	163	67,1	0,30	-	-	-		
Evolution en %	0,02	4,97	16,4	72,3	6,31	75,9	13,5	5,57	0,02	-	-	-		
CMD	0	0,2	0,9	3,8	4,1	1,0	0,4	0,2	0	0	0	0	1	
Pluviométrie à Kidira en 1967	0	124	160	274	60	33	23	0	0	10	0	0	683	37

L'année 1954-55 a un écoulement pérenne et compte un total de 244 jours de débits $\geq 11/s/km^2$ à Gourbassi et 223 jours et Kidira. Le DMAX est enregistré le 01 septembre 1954 avec $1661 m^3/s$ à Gourbassi et le 04 septembre 1954 avec $2692 m^3/s$ à Kidira. Les DCC ($1527 m^3/s$ à Gourbassi et $1810 m^3/s$ à Kidira) et le DC1 ($964 m^3/s$ à Gourbassi et $1504 m^3/s$ à Kidira) sont très élevés, à l'image du DMAX.

VII.2.1.2.3 La crue de l'année du débit moyen le plus faible

L'année du module annuel le plus faible 1983-84 à Gourbassi et Kidira sont enregistrées durant la décennie sèche 1980.

L'année 1983 à Kédougou connaît une pluviométrie très déficitaire de -33,1% avec un total annuel de 833 mm (soit un écart de 411,7 mm) sur 75 jours de pluies. La saison des pluies commence en mai : 40,6 mm et se termine en octobre : 34 mm. Le maximum pluviométrique est noté en juillet avec 213 mm. A Kidira, cette année a une pluviométrie déficitaire de -15,2% avec une moyenne annuelle de 548,6 mm (soit un écart de 98,4 mm) mm sur 29 jours de pluies. La saison des pluies commence en mai : 42 mm et se termine en octobre : 44 mm. Le maximum pluviométrique est noté en juillet avec 173 mm (Tableau 63).

A Gourbassi, l'année du module le plus faible de la série 1983-84 totalise tout de même quatre mois à CMD supérieur à 1 (juillet à octobre), comme en régime tropical de transition. Son maximum mensuel est enregistré au mois de septembre (apparition normale) avec $104 m^3/s$. A la station de Kidira, cette année n'a que deux mois à CMD supérieur à 1 (août et septembre), celui d'octobre étant de 0,9. Comme à Gourbassi, le maximum mensuel est noté au mois de septembre avec $107 m^3/s$ et son module de $33,7 m^3/s$, d'où un important écart moyen de -74,5% par rapport au module moyen.

Tableau 63 : Evolution mensuelle des débits et de la pluie de l'année du débit moyen annuel le plus faible à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

STATION DE GOURBASSI	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	Ecart en %
1983-84 l'année du module annuel et du DMAX le plus faible	0	4,83	20,7	59,1	104	39,7	5,90	0,75	2,1	0,63	0,08	0	19,6	-80,7
Evolution brute	0	4,8	16	38	45	64	34	5,2	1	1	1	0		
Evolution en %	0	4,64	15,3	36,9	43,2	61,8	32,5	4,95	1,30	1,41	0,53	0,08		
CMD	0	0,25	1,06	3,02	5,31	2,03	0,30	0,04	0,11	0,03	0,00	0	1	
Pluviométrie à Kédougou en 1983	40,6	155	213	210	178	34	0	0	0	2,7	0	0	833	-33,1
STATION DE KIDIRA	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN	Ecart en %
1983-84 l'année du module annuel et du DMAX le plus faible	-	-	27,4	61,8	107,4	37,1	6,84	1,9	-	-	-	-	33,7	-74,52
Evolution brute	-	-	27	34	46	70	30	4,9	1,9	-	-	-		
Evolution en %	-	-	25,5	32,0	42,5	65,5	28,2	4,6	1,77	-	-	-		
CMD	0	0	0,7	1,15	2,7	0,9	0,2	0	0	0	0	0	1,0	
Pluviométrie à Kidira en 1983	42	87	173,1	68,1	134,4	44	0	0	0	0	0	0	549	-15,2

L'année hydrologique 1983-84 à Gourbassi compte seulement 101 jours de débits $\geq 11/s/km^2$ sur 228 jours d'écoulement, débutant le 10 juin 1983 avec $0,06 m^3/s$ et s'arrêtant le 23 janvier 1984 avec $0,001 m^3/s$. Le DMAX est noté le 01 septembre avec un débit de $147 m^3/s$. A Kidira, sur 232 jours d'écoulement (soit 4 jours de plus que Gourbassi), seuls 134 jours ont des débits $\geq 11/s/km^2$, soit 33 de plus que Gourbassi. Son écoulement commence le 15 juin 1983 (5 jours après Gourbassi) avec $129 m^3/s$ et s'arrête le 30 janvier 1984 (7 jours après Gourbassi) avec $0,2 m^3/s$, le reste de l'année étant lacunaire. La crue est atteinte le 02 septembre (1 jour après Gourbassi) avec un débit de $152 m^3/s$.

Les débits caractéristiques classés confirment la faiblesse de l'écoulement sur cette année aux stations de Gourbassi et Kidira. Même le DCC ($118 m^3/s$ à Gourbassi et $121 m^3/s$ à Kidira) et le DC1 ($82,3 m^3/s$ à Gourbassi et $83,3 m^3/s$ à Kidira) sont faibles.

VII.2.2 Les étiages

Tout comme les crues se différencient des hautes eaux, les étiages, bien qu'intervenant durant la période des basses eaux, sont différents d'elles. L'étiage est un phénomène extrême de l'écoulement qui survient pendant la période de basses eaux, en saison non pluvieuse au moment où en domaine tropical, les paramètres qui participent au déficit d'écoulement comme l'évaporation et les températures sont élevées.

Sow A. A. (2007) définit l'étiage comme la période étalée sur plusieurs jours ou mois et qui connaît un écoulement faible. Ces débits diminuant jusqu'au débit minimal journalier de l'année.

L'étude des étiages n'est pas une chose facile à cause des difficultés de mesures des débits, surtout pour les cours d'eau à écoulement saisonnier, mais ils ont un caractère douloureux par leur gravité. Les étiages sont caractérisés par leurs dates d'apparition, le débit minimal, le volume et la durée. Nous appelons DMIN, le débit journalier minimum absolu de l'année.

VII.2.2.1 Les étiages en régime fluvial tropical de transition

Les dates d'apparition du DMIN et leurs fréquences, données dans le **Tableau 64**. La date d'apparition normale du DMIN se situe aux mois d'avril et de mai avec 28,9 % et plus précisément dans la troisième décennie d'avril et la première décennie de mai qui enregistrent chacune 15,8 % des fréquences d'apparition. Le DMIN apparaît aussi 9 fois en juin, soit 24 % (apparitions tardives), 6 fois en mars, soit 15,8 % (apparitions précoces) et une fois en février, soit 2,63 %.

Tableau 64 : Nombre et fréquences des dates d'apparitions du DMIN de 1954 à 2007 à Fadougou

Descripteurs	21 au 28 Février	1er au 10 mars	11 au 20 mars	21 au 31 mars	1er au 10 avril	11 au 20 avril	21 au 30 avril	1 au 10 mai	11 au 20 mai	21 au 31 mai	1 au 10 juin	11 au 20 juin	Total
Total	1	1	2	3	3	2	6	6	4	1	8	1	38
Fréquence par décennie en %	2,63	2,63	5,26	7,89	7,89	5,26	15,8	15,8	10,5	2,63	21,1	2,63	100
Total mois	1	6			11			11			9		38
Fréquence mensuelle en %	2,63	15,8			28,9			28,9			24		100
Caractéristiques		précoce			normale						tardive		

La sévérité des étiages à Fadougou est illustrée par le DMIN le plus élevé qui s'établit à 3,2 m³/s, soit 0,34 l/s.km² (ce qui est faible). Cette sévérité est confirmée par les valeurs des DCE, DC11 et DC9 qui sont très faibles.

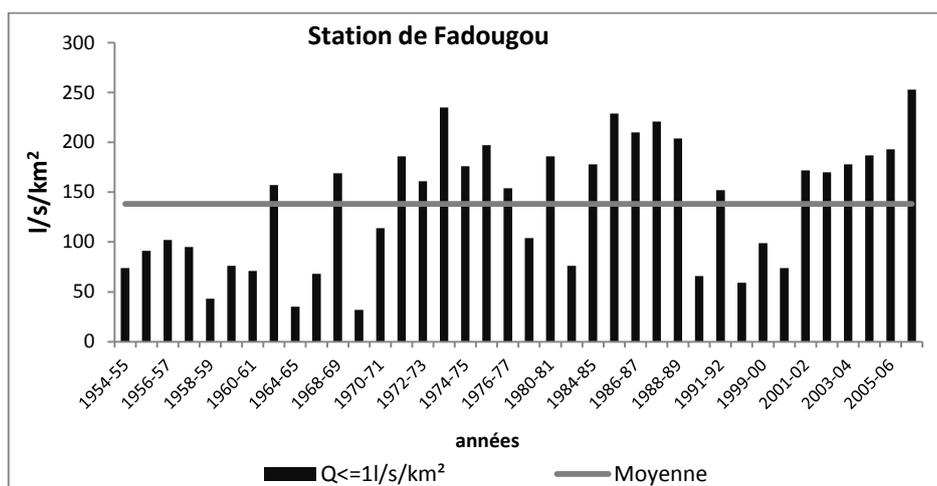


Figure 44 : Evolution des débits minimaux à Fadougou (1954-2007)

Durant la période d'étiages, la station de Fadougou connaît, en moyenne, 138 jours de débits inférieurs à 1 l/s.km² sur 290 jours d'écoulement et 36 jours de débits nuls. Les étiages sont variables, l'écart entre le DMIN le plus élevé (3,21 m³/s) et le plus faible qui s'annule, est de 3,21 m³/s (**Tableau 65**).

Tableau 65 : Caractéristique des étiages à Fadougou (1954-2007)

STATION DE FAGOUGOU	NJE	DMIN	DMIN L/s.km ²	Q=0	Q>=1l/s.km ²	Q< 1l/s.km ²	DCE	DC11	Débits mensuels minimum
Période (ans)	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Moyenne	290	0,5	2,3	36,5	227	138	0,5	1,3	2,3
Minimum de la série	172	0			32	112	0		
Maximum de la série	365	3,21	4,51	166	333	253	7,45		
Ecart en % par rapport à la moyenne	25,7	606	94,2	355	46,7	83,2	463		
Ecart maximum/minimum	193	3,21	4,51	166	221	221	7,4		
Rapport maximum/minimum	2,12				2,97	7,91			
Rapport maximum/moyenne	1,26	7,06	1,94	4,55	1,47	1,83	5,6		
Rapport minimum/moyenne	0,59	0	0	0	0,49	0,23	0	0	0

Le nombre de jours d'écoulement le plus faible revient à l'année 1969-70 avec 172 jours, soit un écart de 40,7 % par rapport à la moyenne. Le DMIN le plus élevé est noté en 1955-56 avec 3,21 m³/s, alors que l'année 2006-07 garde le plus grand nombre de débits nuls avec 166 jours (soit un écart de 129,5 par rapport à la moyenne). L'année 1969-70 a le nombre de jours de débits inférieurs à 1l/s/km² le plus élevé (253 jours) et 2006-07 le nombre de jours de débits supérieurs ou égal à 1l/s/km² le plus faible (32 jours).

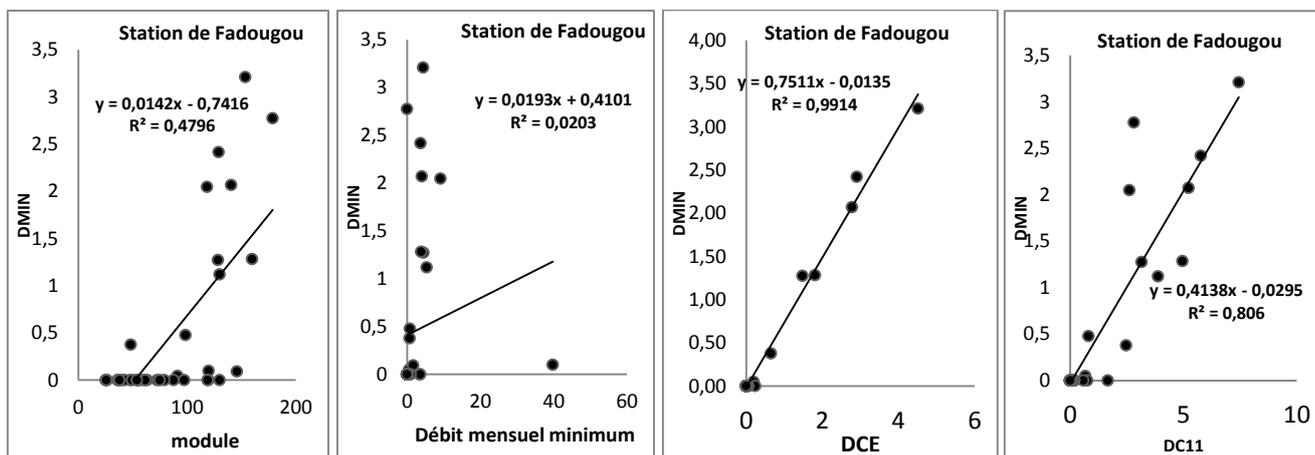


Figure 45 : Exemples de relations entre modules annuels, DCE, DMM, DC11 et DMIN à Fadougou (1954-2007)

La mise en relation entre le DMIN et le module annuel ($R^2 = 0,47$), le DMIN et le débit mensuel minimum ($R^2 = 0,02$), le DMIN et le DCE ($R^2 = 0,99$), le DMIN et le DC11 ($R^2 = 0,80$), montre la forte corrélation entre le DMIN, le DCE et le DC11 (valeurs supérieures à 0,80). L'importance des débits faibles (débit < 1l/s/km² : 138 et débit nul : 36,5) traduit la sévérité des étiages à Fadougou et la faiblesse des réserves souterraines capables de les soutenir. Ces débits faibles sont accentués par les fortes températures intervenues au cœur de la saison non pluvieuse et accompagnées de fortes valeurs d'évaporation, différents facteurs qui diminuent l'écoulement dans le bassin.

VII.2.2.2 Les étiages en régime fluvial tropical pur

A la station de Gourbassi, les dates d'apparition des étiages concernent 8 décades : la dernière décade de mars (23 apparitions), les trois décades d'avril (19) et mai (9) et enfin la première décade des mois de juin (3). La date d'apparition normale du DMIN se situe aux mois de mars et avril avec 75,6 % des fréquences d'apparition et sa troisième décade la décade normale (42,5 %). Gourbassi connaît 21,5 % d'apparitions tardives aux mois de mai et juin.

Contrairement à Gourbassi, la station de Kidira enregistre 18 décades d'apparition du DMIN. La date d'apparition normale du DMIN se situe aux mois de mars et avril avec 45,6 % des fréquences d'apparition dont les 25,9 % au mois de mars. Le DMIN enregistre 37 % d'apparitions tardives aux mois de mai et juin, 7,4 % d'apparitions précoces au mois de février, 5,5 % d'apparitions très tardives en juillet et 3,6 % d'apparitions très précoces en décembre et janvier.

Tableau 66 : Nombre et fréquences des dates d'apparitions du DMIN à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

GOURBASSI	Total	Fréquence par décade en %	Total mois	Fréquence mensuelle en %	Caractéristiques	KIDIRA	Total	Fréquence par décade en %	Total mois	Fréquence mensuelle en %	Caractéristiques
21 au 31 déc						21 au 31 déc	1	1,85	1	1,85	Très précoce
21 au 31 janv.						21 au 31 janv.	1	1,85	1	1,85	
1er au 10 fév.						1er au 10 fév.	1	1,85	4	7,41	Précoce
11 au 20 fév.						11 au 20 fév.	1	1,85			
21 au 28 fév.						21 au 28 fév.	2	3,70			
1 au 10 mars						1er au 10 mars	1	1,85	14	25,9	Normale
11 au 20 mars						11 au 20 mars	5	9,26			
21 au 30 mars	23	42,6	23	42,6	Normale	21 au 30 mars	8	14,8	11	20,4	
1 au 10 avril	6	11,1	19	35,2		1er au 10 avril	3	5,56			
11 au 20 avril	6	11,1				11 au 20 avril	2	3,70			
21 au 30 avril	7	13				21 au 30 avril	6	11,1			
1 au 10 mai	4	7,41	9	16,7	Tardive	1 au 10 mai	6	11,1	8	14,8	
11 au 20 mai	2	3,70				11 au 20 mai	1	1,85			
21 au 31 mai	3	5,56				21 au 31 mai	1	1,85			
1 au 10 juin	3	5,56				3	5,56	1 au 10 juin	7	13	12
11 au 20 juin					11 au 20 juin	5	9,26				
21 au 30 juin					21 au 30 juin	0	0				
1 au 10 juil.				0		1 au 10 juil.	2	3,70	3	5,56	Très tardive
11 au 20 juil.						11 au 20 juil.	1	1,85			
Total	54	100	54	100		Total	54	100	54	100	

Au-delà de l'apparition du DMIN, il faut aussi noter le caractère moins sévère des étiages à Gourbassi et Kidira comparés à Fadougou. Les écarts élevés entre les valeurs maximales et minimales en témoignent. La station de Gourbassi enregistre en moyenne 303 jours d'écoulement, 201 jours de débits inférieurs à 1 l/s/km² et 61,6 jours de débits nuls. Quant à la station de Kidira, la moyenne est de 266 jours d'écoulement, 164 jours de débits inférieurs à 1 l/s/km² et 37,4 jours de débits nuls (Tableau 67). L'année du débit moyen le plus faible 1983-84 a le nombre de jours de débits inférieurs à 1 l/s/km² le plus élevé (264 jours à Gourbassi et 271 jours à Kidira) et l'année 1987-88 le nombre de jours de débits inférieurs à 1 l/s/km² le plus faible (116 jours à Gourbassi et 26 jours à Kidira).

Avec une moyenne de 0,05 m³/s à Gourbassi et 0,24 m³/s à Kidira, les DMIN connaissent une grande variabilité. L'écart entre le DMIN le plus soutenu (1 m³/s à Gourbassi et 4,2 m³/s à Kidira) et le plus faible qui est s'annule, est de 1 m³/s à Gourbassi et 4,2 m³/s à Kidira. Sur les 54 années, seules 10 et 24 années n'ont pas enregistré de débits nuls respectivement à Gourbassi et Kidira. Le DMIN le plus élevé est noté à Gourbassi en 1966-67 avec 1 m³/s et en 1974-75 à Kidira avec 4,2 m³/s, contrairement à l'année du débit moyen le plus élevé 1954-55 dont le DMIN est de 0,02 m³/s à Gourbassi et 0,01 m³/s à Kidira. Pour ce qui est de l'année 1983-84 du débit moyen le plus faible, le DMIN s'annule.

De façon générale, le nombre d'années à écoulement permanent augmente de Fadougou à Kidira. Ainsi, la permanence et la saisonnalité de l'écoulement de la Falémé dépend de la position de la station sur le cours d'eau. Plus la station est en aval, plus l'écoulement dure plus longtemps.

Tableau 67 : Caractéristique des étiages à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

STATION DE GOURBASSI	NJE	Q=0	Q>=1l/s.km ²	Q<=1l/s.km ²	DMIN	DMIN L/s.km ²	DCE	DC11	Débits mensuels minimum
Période (ans)	54	54	54	54	54	54	54	54	54
Moyenne	303	61,6	163,61	201	0,05	0	0,14	0,64	0,34
Minimum de la série	228	0	101	116	0	0	0	0	0
Maximum de la série	365	137	249	264	0,76	0,04	1,09	5,19	3,66
Ecart en % par rapport à la moyenne	137	137	148	148	1	0	1	5	4
Ecart maximum/minimum	137	137	148	148	1	0	1	5	4
Rapport maximum/minimum	1,6	!	2,47	2,28					
Rapport maximum/moyenne	1,2	2,23	1,52	1,31	13,9	13,9	8,03	8,07	10,7
Rapport minimum/moyenne	0,75	0	0,62	0,58	0	0	0	0	0
STATION DE KIDIRA	NJE	Q=0	Q>=1l/s.km ²	Q<=1l/s.km ²	DMIN	DMIN L/s.km ²	DCE	DC11	Débits mensuels minimum
Période (ans)	54	54	54	54	54	54	54	54	54
Moyenne	266	37,4	201,00	164	0,24	0,01	0,1	0,51	20,1
Minimum de la série	109	0	94,00	26	0	0	0	0	0
Maximum de la série	365	135	339,00	271	4,24	0,15	1,32	3,46	900
Ecart en % par rapport à la moyenne	256	135	245	245	4,2	0,1	1,3	3,5	900
Ecart maximum/minimum	256	135	245	245	4,24	0,15	1,32	3,46	900
Rapport maximum/minimum	3,35		3,61	10,4					
Rapport maximum/moyenne	1,37	3,61	1,69	1,65	17,6	17,6	12,6	6,8	44,8
Rapport minimum/moyenne	0,41	0	0,47	0,16	0	0	0	0	0

A Gourbassi, le nombre de jours d'écoulement le plus faible revient à l'année du débit moyen le plus faible 1983-84 avec 228 jours et le maximum de débits nuls avec 137 jours. Pour Kidira, l'année 1972-73 enregistre le nombre de jours d'écoulement le plus faible avec 109 jours et le plus grand nombre de débits nuls avec 135 jours.

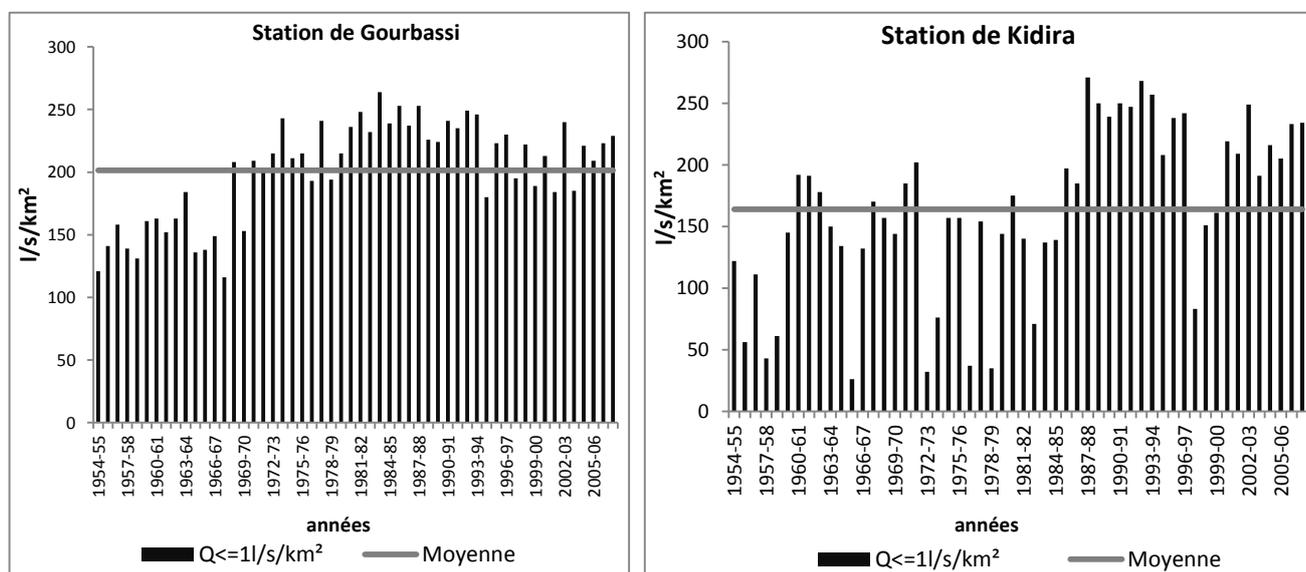


Figure 46 : Evolution des débits minimaux à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Des relations existent entre les indicateurs caractéristiques des étiages : entre le DMIN et le DCE, $R^2 = 0,75$ à Gourbassi et $0,83$ à Kidira ; entre le DMIN et le débit mensuel minimum, $R^2 = 0,45$ à Gourbassi et $0,08$ à Kidira ; entre le DMIN et le DC11, $R^2 = 0,41$ à Gourbassi et $0,27$ à Kidira; entre le DMIN et le module, $R^2 = 0,28$ à Gourbassi et $0,05$ à Kidira (Figure 47). Les corrélations sont meilleures à Gourbassi, alors qu'à Kidira, au-delà du rapport DMIN-DCE, les corrélations sont très faibles. Ces

différentes caractéristiques témoignent de la grande variabilité et de l'irrégularité des étiages dans le bassin de la Falémé.

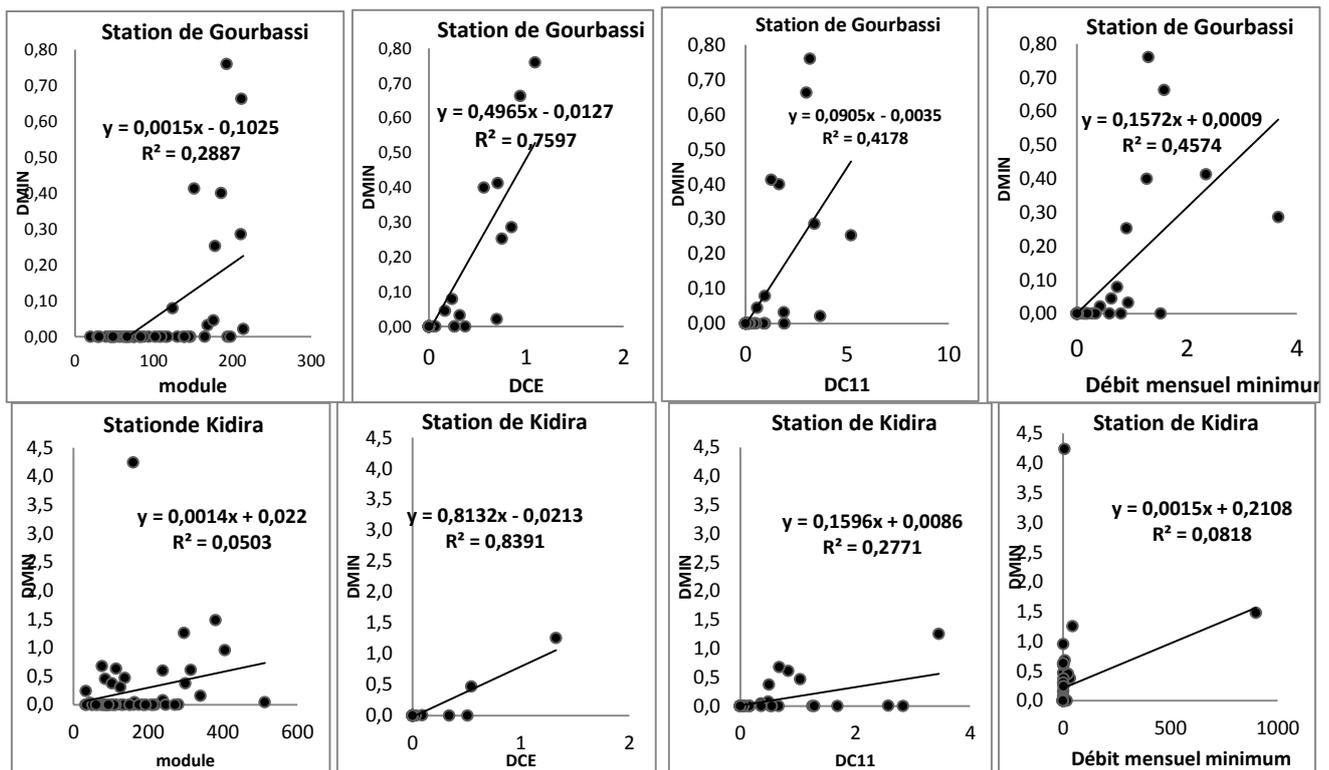


Figure 47 : Exemples de relations entre modules annuels, DCE, DMM, DC11 et DMIN à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

L'étude de la sévérité des étiages dans le bassin de la Falémé renseigne en partie sur la faiblesse des réserves capables de soutenir les débits d'étiage. Leur période d'apparition coïncide avec la saison non pluvieuse qui, en même temps, enregistre les valeurs de températures et d'évaporation maximales, ce qui diminue l'écoulement dans le bassin. La capacité des nappes à soutenir les débits d'étiage n'est possible qu'avec l'étude du tarissement dans le bassin.

VII.3 L'analyse du tarissement dans le bassin

Le tarissement représente « la phase d'écoulement d'un cours d'eau ou d'une source correspondant à la décroissance régulière du débit en l'absence de tout apport météorologique et d'intervention humaine » (Dacharry, 1997⁶⁴). Il commence à partir du jour où la décroissance des débits est continue et correspond à la phase de vidange des nappes, provoquant du coup, une diminution des réserves souterraines de soutien de débit du cours d'eau en période non pluvieuse. Le tarissement suit la répartition temporelle des précipitations qui conditionnent la période des basses eaux et d'étiages. Il est caractérisé par la loi développée par M. Roche, (1963) sous la forme d'une loi exponentielle.

Le caractère exponentiel de la loi de tarissement obéit à la règle suivante : si l'alimentation des nappes est suffisante et homogène sur l'ensemble du bassin, c'est-à-dire si toutes les nappes ont, non pas la

⁶⁴Dacharry M., 1997. : Dictionnaire Français d'Hydrologie, [<http://www.cig.enscm.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICTARIS.HTM>].

même puissance (ce qui serait impossible), mais des puissances semblables au début du tarissement (condition du même départ initial). La faible alimentation en eau des nappes par les pluies, du fait de la nature des roches, entraîne un assèchement des réserves les unes après les autres dans le bassin. Ajoutons enfin que le coefficient ne semble pas dépendre de la superficie du bassin : seul le terme Q_0 , le débit initial au début du tarissement, est affecté par cette caractéristique.

L'étude du tarissement nécessite préalablement une connaissance de la répartition spatio-temporelle des précipitations sur l'ensemble du bassin de la Falémé comme l'a traduit le **Tableau 68**. Son analyse montre que la pluviométrie prend fin en novembre en domaine guinéen (Labé) et en octobre en domaine soudanien sud (Kédougou) et nord (Tambacounda, Bakel). L'évolution de l'écoulement suit celle du climat et toute diminution de la pluie se reflète sur lui. Ainsi, le mois d'octobre, en raison de la diminution de la pluviométrie, correspond au début de décroissance des débits. De ce fait, le débit passe à Fadougou de 289 m³/s à 138 m³/s, soit une décroissance de 150 m³/s (51,1 %). A Gourbassi, il est passé de 476 m³/s à 198 m³/s, soit une décroissance de 278 m³/s (58,4 %). Pour la station de Kidira, le débit diminue de 633 m³/s à 217 m³/s pour une décroissance de 416 m³/s (66 %).

Tableau 68 : Evolution de la pluviométrie et de l'écoulement dans le bassin de la Falémé

Stations pluviométriques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Labé (77 ans)	143	242	324	362	292	161	38,7	7	2	2,8	9,4	42,7	1627
Coefficient pluviométrique	8,79	14,9	19,9	22,2	17,9	9,8	2,38	0,43	0,12	0,17	0,58	2,62	100
Fin saison pluvieuse						8,3	61	30,5					100
Kédougou (57 ans)	52	167	271	330	287	114	8,39	0,39	0,22	0,3	0,86	3,96	1235
Coefficient pluviométrique	4,21	13,5	21,9	26,7	23,2	9,23	0,68	0,03	0,02	0,02	0,07	0,32	100
Fin saison pluvieuse						48,2	46,6	5,2					100
Tambacounda (58 ans)	27,3	98,7	195	231	185	66,8	1,95	0,32	0,03	0,82	0,69	5,53	813
Coefficient pluviométrique	3,36	12,1	24	28,4	22,8	8,22	0,24	0,04	0	0,1	0,08	0,68	100
Fin saison pluvieuse						64	31	5					100
Bakel (59ans)	13,7	65,4	127	168	117	23,6	4,19	0,38	0,38	0,28	0,46	0,94	521
Coefficient pluviométrique	2,63	12,6	24,4	32,2	22,5	4,53	0,8	0,07	0,07	0,05	0,09	0,18	100
Fin saison pluvieuse					23,2	57,1	17,9	1,79					100
Station hydrométrique	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Fadougou (39 ans)	0,91	9,47	80,4	296	289	138	49,8	23,1	11,0	4,64	2,09	1,00	75,4
Evolution en %	0,03	3	24	73	2,40	51,1	30	9,06	4	2	1	0,4	100
CMD	0,01	0,13	1,07	3,92	3,83	1,83	0,7	0,31	0,1	0,06	0,5	0,13	1
Gourbassi (55 ans)	0,24	8,19	82,6	371	476	198	53,4	19,6	8,63	3,62	1,25	0,35	102
Evolution en %	0,02	1,70	15,6	60,6	22,1	58,4	30,4	7,11	2,31	1,05	0,50	0,19	100
CMD	0,002	0,08	0,80	3,63	4,66	1,94	0,52	0,19	1	0,04	0,01	0,002	1
Kidira (55 ans)	0,30	11,6	95,4	438	633	217	56,4	21,8	8,46	3,93	1,84	0,70	124
Evolution en %	0,07	1,79	13,2	54,1	31	66	25,5	5,50	2,11	1	0,33	0,18	100
CMD	0,002	0,09	0,77	3,53	5,10	1,75	0,45	0,18	0,07	0,03	0,01	0,01	1

Cette décroissance des débits est accélérée par l'augmentation de l'évaporation avec les maxima de températures en novembre. Avec l'arrêt de la pluviométrie, la Falémé ne connaît d'alimentation qu'à travers ses réserves souterraines, si toute fois elles existent : c'est la période de tarissement.

La variabilité du tarissement dans le bassin de la Falémé à travers les valeurs caractéristiques, est liée à celle des débits au début et à la fin du tarissement, et du temps qui les sépare. Selon Sow A. A.

(2007) : « l'allongement de la période est due beaucoup moins à l'importance des réserves qu'à la période où intervient le tarissement ».

VII.3.1 Les tarissements en régime fluvial tropical de transition

L'analyse du tarissement en régime fluvial de transition à Fadougou est faite en année moyenne et en années extrêmes. Le tarissement ou la décroissance des débits correspondant à la vidange des nappes en période non influencée par les précipitations, obéit à une loi exponentielle de la forme :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$$

Avec Q_0 étant le débit initial à l'instant t_0 , $(t-t_0)$, le temps exprimé en jours entre l'observation du débit Q_0 et celle du débit Q_t (débit à la fin du tarissement) et α est le coefficient de tarissement qui a pour dimension l'inverse du temps. Le coefficient de tarissement d'une nappe traduit à la fois ses caractéristiques géométriques (dimensions) et ses caractéristiques physiques (perméabilité). L'application de la loi de Darcy permet d'écrire :

$$\alpha = KPs/SI$$

Loi dans laquelle, α est le coefficient de tarissement, K la perméabilité, P la porosité du matériau aquifères, s la section d'échange nappe-rivière, I la largeur de la nappe et S la superficie du bassin versant.

VII.3.1.1 Le tarissement moyen

Comme pour les crues et les étiages dans le bassin, le tarissement connaît une variation annuelle de ses dates de début et de fin (**Tableau 69**). Le début du tarissement concerne 11 décades étalées entre août et décembre : une fois dans la dernière décade du mois d'août, soit 2,63 % des fréquences ; 8 fois en septembre (21 %) ; 13 fois en octobre (34,2 %) ; 12 fois en novembre (31,6 %) ; 3 fois dans la première décade du mois de décembre et une fois dans la première décade de janvier. Le mois d'octobre est le mois normal de début du tarissement (Q_0). Dans ce mois, la deuxième décade est la décade normale avec 8 apparitions (21 %).

La fin du tarissement Q_t quant à elle concerne neuf décades réparties de décembre à avril, avril qui est ici le mois normal de fin. Elle est apparue 5 fois en décembre, soit 13,2 % des cas, 3 fois en février, soit 7,89 %, 8 fois en mars, soit 21 % et enfin 22 fois en avril, soit 57,8 %. Pour ce mois normal d'avril, la troisième décade est la décade normale de fin avec 17 apparitions, suivie de la première décade avec 3 apparitions. Les fréquences de la fin du tarissement en décembre sont très précoces.

Tableau 69 : Nombre et fréquences des dates de début (Q₀) et de fin (Q_t) du tarissement à Fadougou

Date d'apparition du tarissement														
	21 au 31 août	1er au 10 sept	11 au 20 sept	21 au 30 sept	1er au 10 oct	11 au 20 oct	21 au 31 oct	1 au 10 nov	11 au 20 nov	21 au 30 nov	1 au 10 déc	1 au 10 janv	Total	
Total décade	1	0	3	5	2	8	3	4	7	1	3	1	38	
Fréquence	2,63	0	7,89	13,2	5,26	21	7,89	10,5	18,4	2,63	7,89	2,63	100	
total mois	1	8		13			12		3	1			38	
Fréquence	2,63	21		34,2			31,6		7,89	2,63			100	
Date de fin du tarissement														
	21 au 31 déc	1er au 10 janv	11 au 20 janv	21 au 31 janv	1er au 10 fév.	11 au 20 fév.	21 au 28 fév.	1er au 10 mars	11 au 20 mars	21 au 31 mars	1er au 10 avril	11 au 20 avril	21 au 31 avril	Total
Total décade	5	0	0	0	2	0	1	1	5	2	3	2	17	38
Fréquence	13,2	0,	0	0	5,26	0	2,63	2,63	13,2	5,26	7,89	5,26	44,7	100
total mois	5	0		3			8		22				38	
Fréquence	13,2	0		7,89			21		57,9				100	

Le **Tableau 70** présente les caractéristiques du tarissement moyen à la station de Fadougou. Le coefficient de variation qui est supérieur à 0,2 pour tous les paramètres, montrent une grande variabilité. Le débit à la fin du tarissement est le paramètre le plus variable (CV très élevé : 2,2), allant de 0,003 m³/s pour le minimum à 31,9 m³/s pour le maximum, soit un écart de 31,8 m³/s. Il est suivi du débit au début du tarissement (avec un CV de 0,7) dont le minimum est de 1,5 m³/s et le maximum de 521 m³/s, soit un écart de 519 m³/s. Le temps qui sépare les deux débits, avec un CV de 0,2 passe de 39 jours pour le minimum à 225 jours pour le maximum, soit un écart de 186 jours. Enfin, le coefficient de tarissement α connaît une valeur moyenne de 0,042, un coefficient de variation de 0,4, un minimum de 0,019 et un maximum de 0,106.

Tableau 70 : Caractéristique du tarissement moyen à Fadougou (1954-2007)

Descripteurs	STATION DE FADOUGOU			
	Q ₀	Q _t	t	α
Moyenne	170	3,2	159	0,042
Ecart-type	122	7,18	44,6	0,02
Coefficient de variation	0,71	2,23	0,28	0,45
Minimum de la série	1,88	0	39	0,020
Maximum de la série	521	31,9	225	0,106
Ecart maximum/minimum	519	31,9	186	0,08

Le tarissement moyen dure 159 jours, en raison plus de l'influence du domaine climatique guinéen où le cours d'eau prend sa source que de l'importance des réserves souterraines. Le tarissement moyen commence au mois d'octobre avec un débit moyen initial Q₀ de 170 m³/s. Il dure en moyenne 159 jours avec un coefficient α de 0,042. Les débits décroissent fortement à la fin du tarissement, le débit moyen Q_t est de 3,2 m³/s (**Figure 48**).

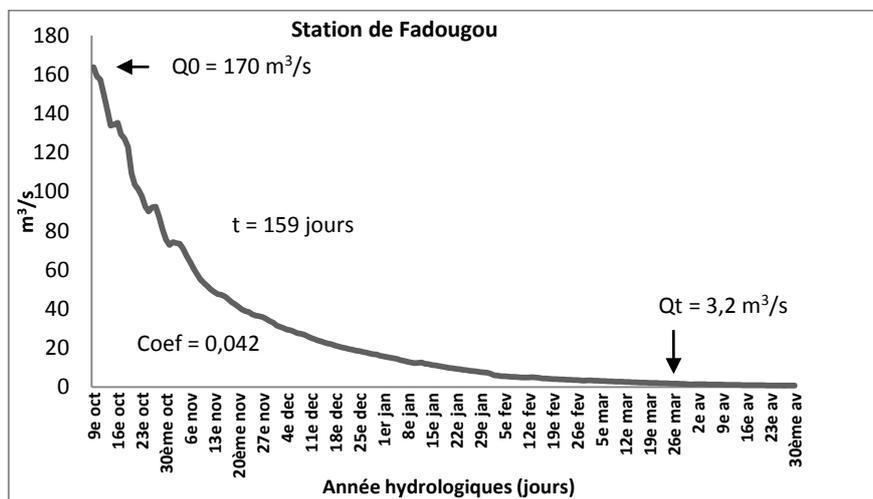


Figure 48 : Courbe de tarissement à Fadougou en année moyenne

VII.3.1.2 Le tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé

Les caractéristiques du tarissement aux années extrêmes sont données dans le **Tableau 71**.

Tableau 71 : Valeurs caractéristiques du tarissement en années extrêmes à Fadougou (1954-2007)

Descripteurs	1958-59 l'année du module annuel le plus élevé	1984-85 l'année du module annuel le plus faible
Q_0	86,5	1,89
Date	08-déc	02-janv
Q_t	28	0,03
Date	01-févr	10-févr
t	55	39
α	0,020	0,106
V m³/an	4218	17,8

L'écoulement de l'année du débit moyen le plus élevé 1958-59 à Fadougou commence le 1er mai avec 3,2 m³/s et l'arrêt intervient le 20 avril avec 0,002 m³/s. Après le DMAX le 26 août (1309 m³/s), la décroissance des débits journaliers intervient jusqu'au minimum qui est nul (**Tableau 57**). Le tarissement connaît deux phases caractérisées par deux courbes de tarissement.

Tableau 72 : Valeurs caractéristiques du tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé à Fadougou

Année	Date	Q_0	Date	Q_t	t	α
Tarissement principal	08-déc	86,5	11-déc	61,7	3	0,113
Tarissement secondaire	11-déc	61,7	02-fév.	0,2	53	0,108

Le tarissement principal débute le 8 décembre (début très tardif) avec un débit de 86,5 m³/s et la fin survient rapidement 3 jours après, c'est-à-dire le 11 décembre avec 62,7 m³/s. Le coefficient de tarissement est égal à 0,113.

Le tarissement secondaire (vidange des nappes) débute le 11 décembre avec un débit de 62,7 m³/s et la fin survient 53 jours après, c'est-à-dire le 1 février avec 28 m³/s. Le coefficient de tarissement est égal à 0,108. La faiblesse de α montre l'importance du soutien des nappes (**Figure 49**).

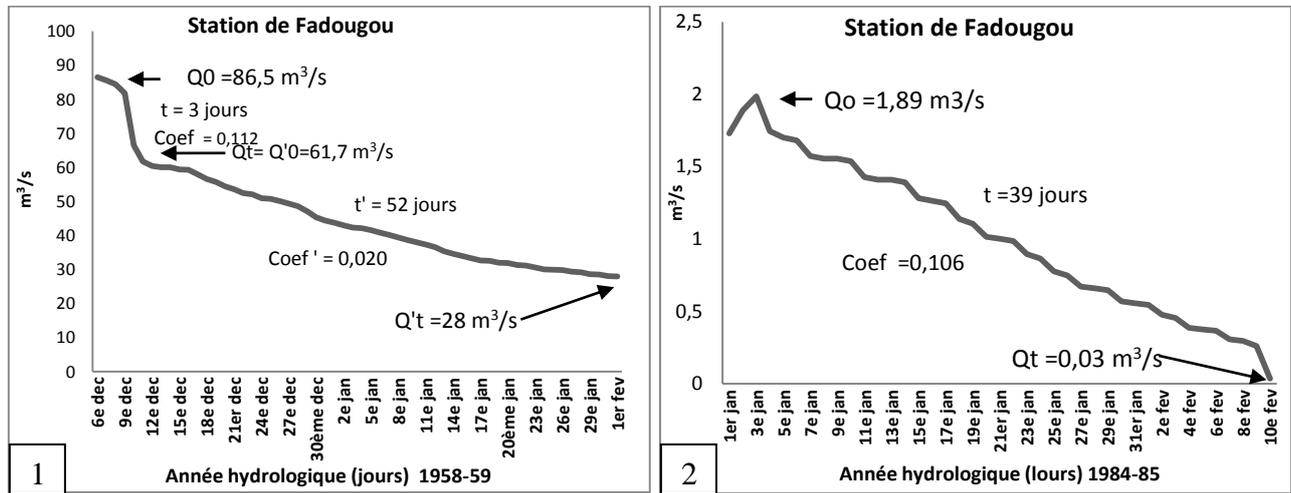


Figure 49 : Courbe de tarissement en années extrêmes à Fadougou : (1) l'année du débit moyen le plus élevé 1958-59 ; (2) l'année du débit moyen le plus faible 1984-85

VII.3.1.3 Le tarissement de l'année du débit moyen le plus faible

L'année du débit annuel le plus faible 1984-85 a un écoulement qui commence le 7 juillet 1984 avec un débit de 7,5 m³/s et s'arrête le 10 février 1984 avec un débit de 0,03 m³/s (Tableau 71 et Figure 49). La vidange des nappes commence le 25 décembre avec un débit de 1,8 m³/s et dure 39 jours. Le coefficient de tarissement est de 0,106 contre 0,020 en 1958-59. Ainsi le tarissement est moins soutenu. De toute la série, l'année du débit moyen le plus faible 1984-85 est l'année la moins soutenue.

L'observation des valeurs caractéristiques du tarissement à la station de Fadougou permet de faire les constats suivants :

- ✓ Le tarissement s'exprime par : soit une droite unique, soit deux droites.
- ✓ L'année 1958-59 du module moyen annuel le plus élevé, n'est pas forcément l'année la plus soutenue ($\alpha = 0,020$).
- ✓ L'année du débit moyen le plus faible 1984-85 qui a le module le plus faible, est l'année la moins soutenue avec un coefficient de tarissement de 0,106.
- ✓ L'année la plus soutenue 1954-55 a un tarissement qui dure 178 jours et le coefficient de tarissement le plus faible de la série avec 0,020.

VII.3.2 Le tarissement en régime fluvial tropical pur

Le tarissement en régime fluvial tropical pur du bassin de la Falémé est analysé aux stations de Gourbassi et Kidira en année moyenne et en années extrêmes.

VII.3.2.1 Le tarissement moyen

A Gourbassi, le début du tarissement s'étale aussi sur 10 décades comme à Fadougou allant de septembre à décembre. Le débit Q_0 apparaît 10 fois en septembre (18,5 % des fréquences), 37 fois en octobre (68,5 % des fréquences), 6 fois en novembre (11,1 % des fréquences) et une fois dans la

dernière décade du mois de décembre Le mois d'octobre est le mois normal de début du tarissement (Q_0). Sa deuxième décade est la décade normale avec 16 apparitions (29,6 %). L'apparition du débit (Q_0) est précoce au mois de septembre et tardive en novembre.

La fin du tarissement Q_t à Gourbassi s'établit sur dix décades allant de janvier à avril. Elle est apparue 2 fois en janvier avec 3,7 %, 4 fois en février avec 7,4 %, 19 fois en mars avec 35,1 % et enfin, 29 fois en avril avec 53,7 %. Pour ce dernier, la troisième décade est la décade normale de fin avec 19 fois. Les fréquences élevées du mois d'avril, surtout à sa troisième décade, indiquent le caractère plus ou moins pérenne de l'écoulement à Gourbassi (Tableau 74).

Tableau 73 : Nombre et fréquences des dates de début (Q_0) et de fin (Q_t) du tarissement à Gourbassi

Date d'apparition du tarissement														
Descripteurs	21 au 31 août	1er au 10 sept	11 au 20 sept	21 au 30 sept	1er au 10 oct	11 au 20 oct	21 au 31 oct	1 au 10 nov	11 au 20 nov	21 au 30 nov	21 au 31 déc		Total	
Total décade		1	1	8	14	16	7	3	2	1	1		54	
Fréquence		1,85	1,85	14,8	25,9	29,6	13	5,55	3,7	1,85	1,85		100	
total mois		10			37			6			1		54	
Fréquence		18,5			68,5			11,1			1,85		100	
Date de fin du tarissement														
Descripteurs	21 au 31 déc	1er au 10 janv	11 au 20 janv	21 au 31 janv	1er au 10 fév.	11 au 20 fév.	21 au 28 fév.	1er au 10 mars	11 au 20 mars	21 au 31 mars	1er au 10 avril	11 au 20 avril	21 au 31 avril	Total
Total décade	0	0	0	2	1	2	1	6	6	7	5	5	19	54
Fréquence	0	0	0	3,7	1,85	3,7	1,85	11,1	11,1	13	9,26	9,26	35,2	100
total mois		2			4			19			29			54
Fréquence		3,70			7,41			35,2			53,7			100

A Kidira, le début du tarissement s'étale sur 9 décades comme à Gourbassi allant de septembre à décembre. Le débit Q_0 apparait, comme Gourbassi, 10 fois en septembre (18,5 % des fréquences) ; 39 fois en octobre, soit 2 de plus que Gourbassi (72,2 %) ; 5 fois en novembre (9,2 %) et enfin une fois dans la première décade du mois de décembre. Le mois d'octobre est le mois normal de début du tarissement (Q_0) et totalise près de 3/4 des fréquences et sa deuxième décade, la décade normale avec 17 apparitions (31,4 %). L'apparition du débit (Q_0) est précoce au mois de septembre et tardive en novembre.

Tableau 74 : Nombre et fréquences des dates de début (Q_0) et de fin (Q_t) du tarissement à Kidira

Date de début du tarissement															
Descripteurs	21 au 31 août	1er au 10 sept	11 au 20 sept	21 au 30 sept	1er au 10 oct	11 au 20 oct	21 au 31 oct	1er au 10 nov	11 au 20 nov	21 au 30 nov	1 au 10 déc			Total	
Total décade		1	2	7	12	17	10	4	1		1			54	
Fréquence		1,85	3,7	13	22,3	31,4	18,5	7,41	1,85	0	1,85			100	
total mois		10			39			5			1			54	
Fréquence		18,5			72,2			9,26			1,85			100	
Date de fin du tarissement															
Descripteurs	21 au 30 sept	21 au 31 déc	1er au 10 janv	11 au 20 janv	21 au 31 janv	1er au 10 fév.	11 au 20 fév.	21 au 28 fév.	1er au 10 mars	11 au 20 mars	21 au 31 mars	1er au 10 avril	11 au 20 avril	21 au 31 avril	Total
Total décade	1	3	3	0	1	1	2	4	3	4	6	3	6	17	54
Fréquence	1,9	5,6	5,6	0	1,9	1,9	3,7	7,4	5,6	7,4	11,1	5,6	11,1	31,5	100
total mois	1	3	4			7			13			26			54
Fréquence	1,85	5,56	7,41			12,96			24,07			48,15			100

La fin du tarissement Q_t quant à lui est plus variable comparée à Gourbassi, avec douze décades allant de septembre à avril qui est ici le mois normal de la fin. Elle est apparue une fois en septembre, 3 fois en décembre, soit 5,6 % des cas, 4 fois en janvier avec 7,4 %, 7 fois en février, soit 12,9 %, 13 fois en mars, soit 24,7 % et enfin 26 fois en avril, soit 48,1 %. Pour ce mois normal, avril, la troisième décade est la décade normale de fin avec 31,5 %. Les fréquences élevées de cette décade témoignent du caractère pérenne de l'écoulement à Kidira sur certaines années.

Tableau 75 : Caractéristique du tarissement moyen à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Descripteurs	STATION DE GOORBASSI				STATION DE KIDIRA			
	Q_0	Q_t	t	α	Q_0	Q_t	t	α
Période (ans)	54	54	54	54	54	54	54	54
Moyenne	305	0,2	170	0,062	355	4,29	156	0,053
Minimum de la série	51,8	0	105	0,025	44,7	0	8	0,022
Maximum de la série	1314	2,55	221	0,103	2636	114	217	0,108
Ecart maximum/minimum	1262	2,54	116	0,08	2591	114	209	0,09

Le débit moyen au début du tarissement (Q_0) est de 308 m³/s à Gourbassi et 355 m³/s à Kidira et le débit moyen à la fin du tarissement (Q_t) de 0,2 m³/s à Gourbassi et 4,2 m³/s à Kidira. La durée moyenne du tarissement (t) à Gourbassi est de 170 jours et le coefficient moyen de tarissement (α) de 0,062. A Kidira, la durée moyenne du tarissement (t) est de 156 jours et le coefficient moyen de tarissement (α) de 0,053. Pour le soutien des nappes aux stations de Gourbassi et de Kidira, la Falémé est plus soutenue à Kidira ($\alpha = 0,053$) qu'à Gourbassi ($\alpha = 0,062$) et à Fadougou ($\alpha = 0,042$).

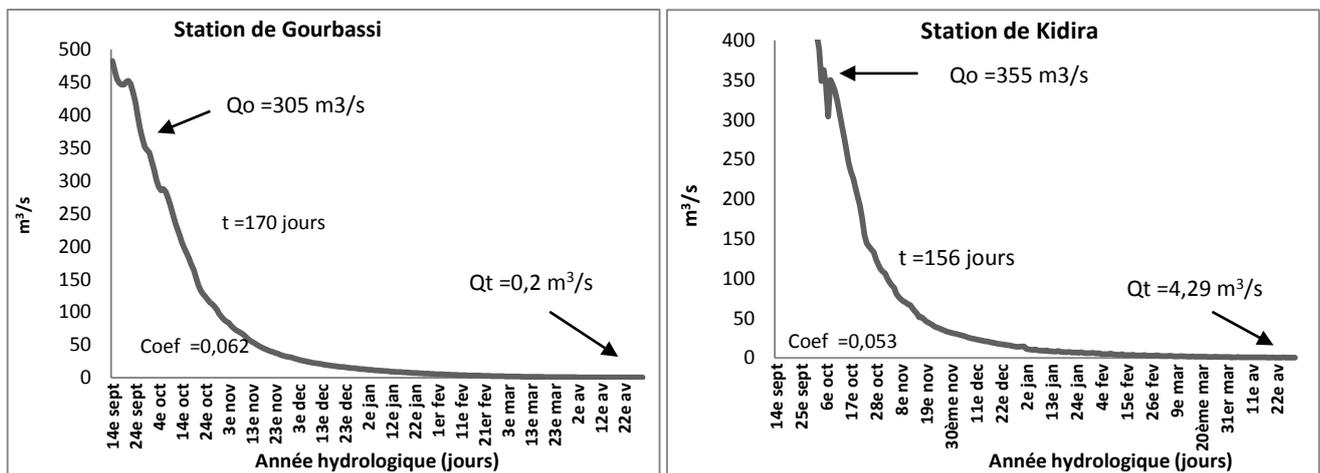


Figure 50 : Evolution du tarissement moyen à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Contrairement à Gourbassi, à Kidira, les années particulières du tarissement ne correspondent pas forcément aux années extrêmes de l'écoulement. L'année qui a le coefficient α le plus élevé (0,108) et la moins soutenue est 1985-86. Son tarissement commence le 5 octobre avec un débit initial Q_0 qui s'établit à 151 m³/s et dure 119 jours (Tableau 75).

VII.3.2.2 Le tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé

Les caractéristiques des années extrêmes sont données dans le **Tableau 76** et indiquent le caractère variable du tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé comparée à l'année moyenne et à l'année du débit moyen le plus faible.

Tableau 76 : Valeurs caractéristiques du tarissement en années extrêmes à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Descripteurs	STATION DE GOURBASSI		STATION DE KIDIRA	
	1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	1983-84 l'année du module annuel et du DMAX le plus faible	1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	1983-84 l'année du module annuel et du DMAX le plus faible
Q_0	76,1	51,8	73,9	44,7
Date	29-nov	10-oct	10-déc	14-oct
Q_t	1,8	0,001	0,9	0,2
Date	30-avr	23-janv	30-avr	30-janv
t	152	105	141	108
α	0,025	0,103	0,031	0,050
V m ³ /an	3089	501	2365	892

A Gourbassi, le débit initial du tarissement Q_0 intervient le 29 novembre avec 76,1 m³/s et le débit à la fin du tarissement Q_t le 30 avril avec 1,8 m³/s. Le tarissement dure 152 jours avec un coefficient α de 0,025. L'année 1954-55 est l'année la plus soutenue, cependant, elle l'est moins à Gourbassi qu'à Kidira.

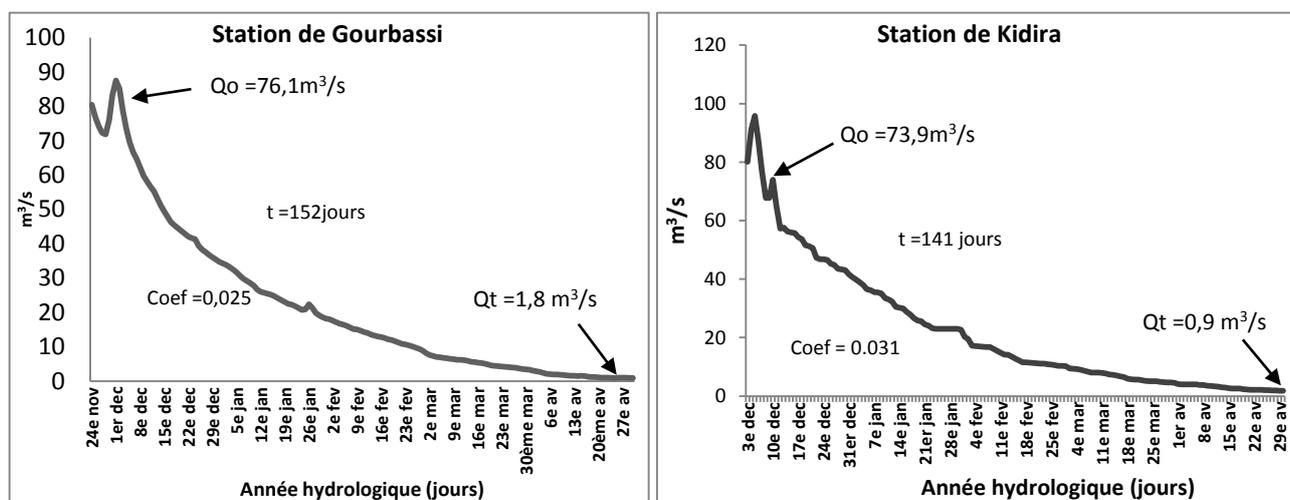


Figure 51 : Courbe de tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

A Kidira, l'année 1954-55 est l'année au coefficient de tarissement le plus faible ($\alpha = 0,031$) et donc l'année la plus soutenue. Le débit initial de tarissement Q_0 est atteint le 10 décembre avec 73.9 m³/s et le débit à la fin du tarissement Q_t le 30 avril avec 0,9 m³/s, soit 141 jours.

VII.3.2.3 Le tarissement de l'année du débit moyen le plus faible

A Gourbassi, l'année 1983-84 est à la fois l'année du débit moyen le plus faible, l'année du coefficient le plus élevé (0,103) et enfin l'année la moins soutenue. Son écoulement débute le 10 juin 1983 avec 0,06 m³/s et s'arrête le 23 janvier 1984 avec 0,001 m³/s, dure 228 jours et compte 101 jours de débits \geq

11/s/km². La vidange des nappes commence le 10 octobre avec un débit de 51,8 m³/s, dure 105 jours et s'achève le 23 janvier avec un débit de 0,001 m³/s, le coefficient de tarissement étant de 0,103 (Tableau 76 et Figure 52).

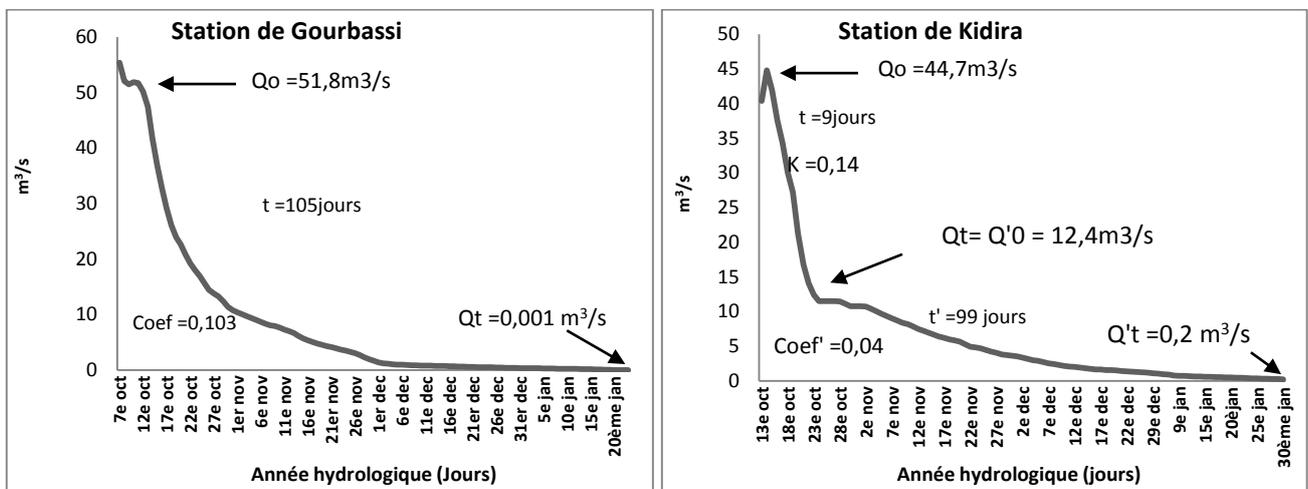


Figure 52 : Courbe de tarissement de l'année du débit moyen le plus faible 1983-94 à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

A Kidira, l'année 1983-84 totalise 232 jours d'écoulement (soit 4 jours de plus que Gourbassi) allant du 15 juin 1983 avec 129 m³/s au 30 janvier 1984 avec 0,2 m³/s (le reste de l'année étant lacunaire). Son DMAX est enregistré le 02 septembre avec un débit de 152 m³/s (Tableau 76). Le tarissement y est caractérisé par deux courbes :

Tableau 77 : Valeurs caractéristiques des deux tarissements de l'année du débit moyen le plus faible à Kidira (1954-2008)

Année	Date	Q ₀	Date	Q _t	t	α
Tarissement principal	14-oct	44,7	23-oct	12,4	9	0,142
Tarissement secondaire	23-oct	12,4	30-janv	0,2	99	0,042

- Le tarissement principal commence le 14 octobre avec un débit initial Q₀ qui s'établit à 44,6 m³/s et dure 9 jours, le coefficient de tarissement étant de 0,142.

- Le tarissement secondaire ou vidange des nappes démarre le 23 octobre avec un débit initial Q'₀ qui s'établit à 12,4 m³/s, dure 99 jours et s'arrête le 30 janvier avec un débit Q_t de 0,2. Le coefficient de tarissement est de 0,042.

De façon générale dans le bassin de la Falémé, l'observation des valeurs caractéristiques du tarissement permet de faire les constats suivants :

- le tarissement s'exprime par : soit une droite unique, soit deux droites ;
- l'année 1983-84 qui a le module le plus faible à Kidira, n'est pas l'année la moins soutenue (α =0,05) ;

- l'année la moins soutenue à Kidira est l'année 1985-86 avec le coefficient de tarissement le plus faible de la série : 0,107 ;
- l'année 1954-55 du débit moyen le plus élevé à Kidira est l'année la plus soutenue ($K=0,03$) ;
- l'année du débit moyen le plus faible 1983-84 à Gourbassi, est en même temps l'année la moins soutenue avec un coefficient de tarissement de 0,103 ;
- l'année 1954-55 du module annuel le plus élevé à Gourbassi, est l'année la plus soutenue ($\alpha = 0,02$).

Conclusion partielle

Le régime moyen du bassin de la Falémé est saisonnier (toutes les années de la série n'ont pas un écoulement pérenne), il est caractérisé par une grande variabilité de l'écoulement à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière.

L'analyse des coefficients mensuels de débits ont montré deux régimes distincts : le régime tropical de transition caractérisé à la station de Fadougou qui présente une période de hautes eaux de quatre mois (de juillet à octobre) ; le régime tropical pur déterminé par les stations de Gourbassi et de Kidira, avec une période de hautes eaux qui dure trois mois (d'août à octobre).

Le bassin de la Falémé a une alimentation exclusivement pluviale dans ses deux régimes. Pour son évolution mensuelle, le maximum apparaît généralement en août à Fadougou et septembre à Gourbassi et Kidira, alors que le minimum intervient partout en mai. Les deux régimes du bassin sont unimodaux et immodérés (R est de 367 à Fadougou, 2330 à Gourbassi et 2250 à Kidira). Quant à la montée des débits jusqu'au maximum, elle se réalise en trois mois (juin à août) à Fadougou et en quatre mois (juin à septembre) à Gourbassi et Kidira.

A l'échelle journalière, l'hydrogramme de crue dans le bassin est en forme de "cloche", caractérisé par une évolution monogénique, avec une seule pointe correspondant au maximum journalier. Du minimum au maximum journalier, la montée des eaux se réalise sous forme de "pics" correspondant à des "fausses crues" (Sow A.A., 1984 ; 2007) jusqu'au maximum journalier de l'année. La montée des eaux présente une pente plus redressée que la descente jusqu'au minimum. De façon générale, l'écoulement augmente de Fadougou à Kidira : entre 1954 et 2008, le module moyen est de 76,5 m³/s à Fadougou, 103 m³/s à Gourbassi et 129 m³/s à Kidira. Ainsi, le débit écoulé dépend de la position de la station sur le cours d'eau. Plus la station est en aval, plus l'écoulement est important.

Pour les années extrêmes (année du débit moyen le plus élevé et année du débit moyen le plus faible), la position est variable entre le régime tropical de transition et le régime tropical pur. A la station de Fadougou, l'année 1958-59 est l'année du débit moyen le plus élevé (avec un module de 179 m³/s) et

l'année 1984-85 l'année du débit moyen le plus faible (25,2 m³/s). En régime tropical pur, bien que les années aient changé, une stabilité est notée avec l'année 1954-55 l'année du débit moyen le plus élevé à Gourbassi (214 m³/s) et Kidira (281 m³/s) et l'année 1983-84 l'année du débit moyen le plus faible avec 19,6 m³/s à Gourbassi et 33,7 m³/s à Kidira.

Les débits de la Falémé présentent d'importantes fluctuations saisonnières dont les conséquences sur l'environnement sont multiples, d'où l'intérêt d'étudier l'écoulement extrême (crues et étiages). Le régime hydrologique des cours d'eau du bassin versant de la Falémé, est caractérisé par des étiages presque nuls (de décembre à juin), alors que les crues sont notées pendant des périodes de hautes eaux concentrées sur de courtes périodes de 3 à 4 mois (juillet à octobre).

Les crues sont caractérisées par une grande variabilité avec une évolution interannuelle irrégulière. Dans le bassin, les dates d'apparition des DMAX varient entre la première décade du mois d'août et la deuxième décade du mois d'octobre. Le mois normal d'apparition est le mois d'août à Fadougou (60,5 %) et le mois de septembre à Gourbassi (55,6 %) et Kidira (57,4 %).

Les étiages dans le bassin connaissent aussi une grande variation annuelle, surtout en ce qui concerne leurs dates d'apparition. La date d'apparition normale du DMIN se situe aux mois d'avril et de mai à Fadougou (avec 57,8 % des fréquences) et aux mois de mars et avril à Gourbassi (75,6 %) et Kidira (46,3 %). A Kidira, les apparitions sont dispersées sur 18 décades contre 12 décades à Fadougou et 8 décades à Gourbassi. De façon générale, le nombre d'années à écoulement permanent augmente de Fadougou à Kidira. Ainsi, la permanence et la saisonnalité de l'écoulement de la Falémé dépend de la position de la station sur le cours d'eau. Plus la station est en aval, plus l'écoulement dure plus longtemps.

Le tarissement connaît également une grande variabilité dans le bassin. Le début du tarissement concerne 11 décades à Fadougou, 10 à Gourbassi et 9 à Kidira, alors que pour la fin du tarissement, il y a 9 décades à Fadougou, 10 à Gourbassi et 12 à Kidira. Le mois d'octobre est le mois normal de début du tarissement à Fadougou (34,2 %), Gourbassi (68,5 %) et Kidira (72,2 %) et le mois d'avril le mois normal de fin du tarissement avec 57,9 % à Fadougou, 53,7 % à Gourbassi et 48,1 % à Kidira. Le coefficient moyen de tarissement, de 0,042 à Fadougou, 0,062 à Gourbassi et 0,053 à Kidira, montre que la Falémé est plus soutenue à Kidira qu'à Gourbassi et à Fadougou.

La caractérisation de l'écoulement de la Falémé, à travers l'analyse des régimes, des crues, des étiages et du tarissement (aux stations de Fadougou, Gourbassi et Kidira), est complétée par une estimation de l'abondance et des disponibilités en eau du bassin. La variabilité de l'écoulement dans le bassin peut ainsi se percevoir à travers le bilan hydrologique.

Le bilan hydrologique de même que les disponibilités annuelles en eau du bassin sont étudiés au niveau des trois stations de la Falémé. Ces deux paramètres sont nécessaires dans le cadre de la gestion et la mise en place du barrage de Gourbassi. La **Figure 53** donne les estimations des disponibilités en eau de surface.

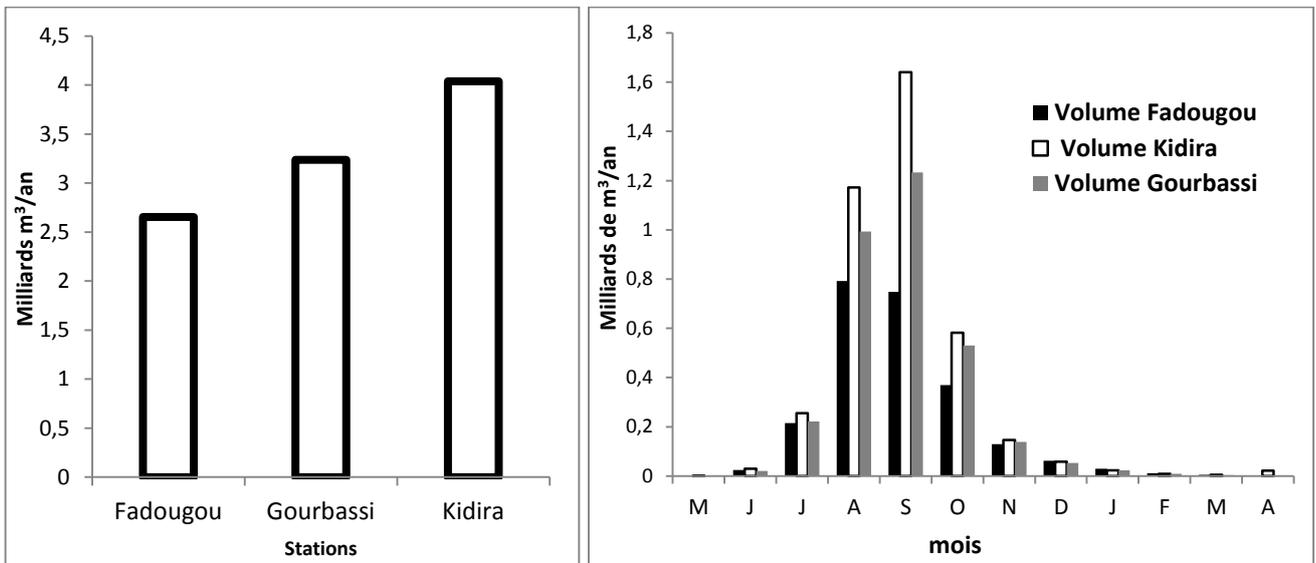


Figure 53 : Volumes d'eau moyens annuels et mensuels écoulés dans le bassin de la Falémé

L'analyse des disponibilités en eau d'un bassin versant sur un temps donné passe par la détermination du bilan hydrologique qui obéit à une relation de la forme :

$$Pmm = Qmm + Emm \pm \Delta Rmm$$

Avec Pmm : la lame d'eau en mm, appelée pluie moyenne estimée et reçue par le bassin ; Qmm : la lame d'eau écoulée en mm en tenant compte de la surface du bassin versant ; Emm : la lame d'eau en mm perdue ou prélevée par évaporation ; $\pm \Delta Rmm$: la lame d'eau mise en réserve dans les nappes ou les sols ($-\Delta Rmm$) et restitué par ses mêmes réserves en un moment ($+\Delta Rmm$).

Les termes de Emm et $-\Delta Rmm$ participent au déficit d'écoulement et pour le terme $+\Delta Rmm$ généralement dans la mesure du possible, on essaye de s'en affranchir en partant de moments privilégiés du cycle hydrologique entre lesquels les variations de niveau des réserves peuvent être considérées comme nulles ou négligeables (Sow A.A., 2007). ΔRmm devient négligeable pour une longue période (pluriannuelle), du fait que la partie mise en réserve équivaut à celle qui est restituée ; et les deux termes s'équilibrent dans un grand bassin, ce qui est le cas. Ainsi, l'équation du bilan hydrologique devient :

$$Pmm = Qmm + Emm$$

Qmm est estimée de la façon suivante :

$$Qmm : \frac{Qm^3S^{-1} \times t(s)}{S(km^2).10^3}$$

Où Qm³/s est le débit moyen, t(s) : multiplicateur de débit, égal au nombre de secondes dans l'année, et pour une longue période t(s) est égal à : 31 557 000 s.

Le volume écoulé (V m³/an) encore appelé indice d'écoulement, est aussi obtenu comme suite :

$$V m^3 : Qm^3/s \times t(s)$$

Pour le coefficient d'écoulement (CE%), il est déterminé par le rapport entre la lame d'eau écoulée et la pluie moyenne reçue par le bassin :

$$CE \% = \frac{Qmm}{Pmm} \times 100$$

Enfin, le déficit d'écoulement (DEmm) ou la lame d'eau en mm perdue ou prélevée par évaporation (Emm) est obtenu de la façon suivante :

$$DEmm = Pmm - Qmm$$

VIII.1 Le bilan de l'eau dans le régime fluvial tropical de transition

L'analyse des disponibilités en eau en régime fluvial de transition à Fadougou est faite en année moyenne et en années extrêmes. Le **Tableau 78** présente les caractéristiques du bilan moyen annuel.

Tableau 78 : Caractéristiques du bilan moyen annuel à Fadougou (1954-2007)

STATION DE FADOUGOU	Qm ³ /s	Pmm	Qmm	DE mm	CE %	Vm ³ /an
Moyenne	84,1	1495	285	1210	19	2653943700
Ecart-type	43,4	175	147	145	8	
Coefficient de variation	0,52	0,12	0,52	0,12	45	0,52
Maximum	179	1876	607	1269	32	5648703000
Minimum	25,2	1233	85,5	1147	7	795236400
Ecart	154	642	522	121	25	4853466600

Le débit écoulé (Qm³/s), le volume d'eau (Vm³/an), la lame d'eau moyenne écoulée (Qmm), le déficit d'écoulement (DE mm), le coefficient d'écoulement (CE%)

VIII.1.1 Le bilan moyen

Les disponibilités annuelles, évaluées à la fois sur les lames d'eau et les volumes écoulés, montrent une grande variabilité. La pluie moyenne du bassin, le déficit d'écoulement et le coefficient d'écoulement sont associés à l'analyse (**Tableau 78**).

La lame d'eau moyenne écoulée à la station de Fadougou s'établit à 285 mm et connaît une grande variabilité avec un coefficient de variation de 0,52 (**Tableau 78**). L'écart entre le minimum qui est de 85,5 mm et le maximum de 607 mm, est très élevé avec 522 mm. La station de Fadougou compte 17 années sur un total de 38 (soit 44,7 %) aux lames d'eau écoulées supérieures à la moyenne qui est de 285 mm.

Les volumes d'eau annuels à Fadougou, comme les lames d'eau écoulées, sont très variables avec un coefficient de variation élevé (0,52). Le volume moyen annuel écoulé est de 2 653 943 700 m³ pour un maximum de 5 648 703 000 m³ et un minimum de 795 236 400 m³, ce qui fait un écart entre maximum et minimum très élevé : 4 853 466 600 m³ (**Tableau 78**). A Fadougou, 21 années (soit une fréquence de 55,3 %) enregistrent des volumes écoulés inférieurs au volume moyen.

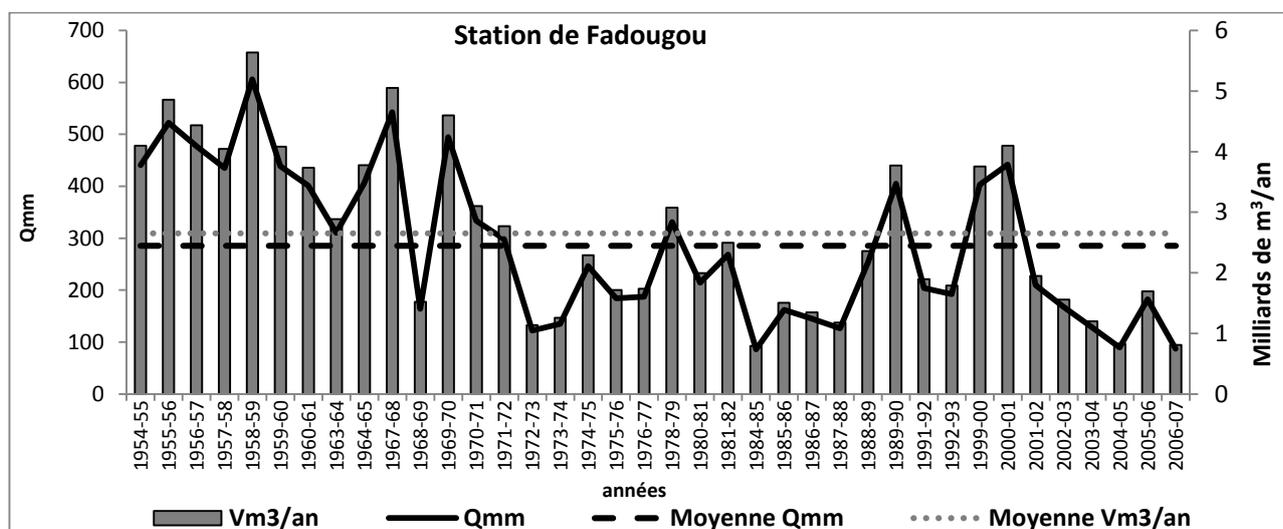


Figure 54 : Evolution annuelle de la lame d'eau écoulée et du volume à Fadougou (1954-2007)

Les disponibilités varient d'un mois à l'autre et le maximum est noté, durant la saison pluvieuse, au mois d'août qui représente en moyenne 33,9 % du volume moyen, suivi du mois de septembre qui totalise 30,3 % du même volume.

En régime tropical de transition (**Tableau 78**), avec une pluie moyenne de 1495 mm, le déficit d'écoulement est relativement élevé (1210 mm) et témoigne de l'importance des pertes d'eau, surtout par évaporation, dans le haut bassin. Ainsi le coefficient d'écoulement est très faible (seulement 19% de la pluie moyenne).

VIII.1.2 Le bilan en année du débit moyen le plus élevé

Les caractéristiques du bilan aux années extrêmes sont données dans le **Tableau 79**. En 1958-59, année du débit moyen le plus élevé, avec 179 m³/s, la lame d'eau écoulée est de 607 mm (soit 322 mm de plus que l'année moyenne). Quant au volume annuel, il est estimé à 5 644 944 000 m³ et est 2,13 fois supérieur au volume moyen. Cette année a enregistré une pluie moyenne de 1491 mm et le déficit d'écoulement est de 884 mm pour un coefficient d'écoulement de 41%.

Tableau 79 : Caractéristiques du bilan en années extrêmes à Fadougou (1954-2007)

Descripteurs	1958-59 l'année du module annuel le plus élevé	1984-85 l'année du module annuel le plus faible	Ecart entre années extrêmes
Qm³/s	179	25,2	154
Pmm	1491	1223	268
Qmm	607	85,5	522
DE mm	884	1138	254
CE %	41	7	34
Vm³/an	5644944000	794707200	4850236800

Pour ces deux années, t(s) est égal à : 31 536 000 s

L'année du débit moyen le plus élevé a une pluie moyenne, de 1491 mm, presque égale à celle de l'année moyenne qui est de 1495 mm, alors que sa lame d'eau écoulée avec 607 mm est largement supérieure à celle de l'année moyenne qui n'est que de 285 mm, ce qui donne un coefficient d'écoulement de 41% en année du débit moyen le plus élevé et seulement 19% en année moyenne. En 1958-59, le coefficient d'écoulement, très élevé, s'explique par les conditions de l'année pluviométrique précédente 1957-58. Durant cette année, le total pluviométrique atteint 1943 mm à la station de Labé et 2228 mm à la station de Tougué (ce qui est élevé). Ce total pluviométrique élevé dans les stations du haut bassin, a dû saturer l'atmosphère, diminuant du coup l'évaporation (le déficit d'écoulement étant de 884 mm). En plus, le début de cette année pluvieuse est précoce à Labé (48 mm en avril) et Tougué (12 mm en avril) et la fin tardive à Labé (1 mm en décembre), d'où l'étalement de la saison pluvieuse, ce qui s'est répercuté sur l'écoulement de l'année 1958-59 avec une lame d'eau importante (607 mm).

VIII.1.3 Le bilan en année du débit moyen le plus faible

Pour l'année du débit moyen le plus faible 1984-85 avec un débit de 25,2 m³/s (**Tableau 79**), la lame d'eau écoulée est de 85,2 mm, soit un écart de 522 mm comparée à celle de l'année du débit moyen le plus élevé (ce qui est très élevé). Le volume annuel écoulé en 1984-85 est de 794 707 200 m³, soit un écart de 4 850 236 800 m³ par rapport à l'année 1958-59. La pluie moyenne est de 1223 mm et les pertes, importantes avec 1138 mm, expliquent la faiblesse du coefficient d'écoulement qui n'est que de 7 %.

VIII.2 Le bilan de l'eau dans le régime fluvial tropical pur du bassin

Le bilan en régime fluvial tropical pur du bassin de la Falémé est analysé aux stations de Gourbassi et Kidira en année moyenne et en années extrêmes. Les caractéristiques du bilan moyen annuel sont données dans le **Tableau 80**.

VIII.2.1 Le bilan moyen

Les disponibilités annuelles à Gourbassi et Kidira sont évaluées sur les lames d'eau et les volumes écoulés, avec la pluie moyenne du bassin, le déficit et le coefficient d'écoulement associés à l'analyse (**Tableau 80**).

Tableau 80 : Caractéristiques du bilan annuel à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

STATION DE GOURBASSI	Qm ³ /s	Pmm	Qmm	DE mm	CE %	Vm ³ /an
Période (ans)	54	54	54	54	54	54
Moyenne	103	1263	190	1073	15	3250371000
Ecart-type	55,8	184	103	125	6	
Coefficient de variation	0,54	0,15	0,54	0,12	45	0,54
Maximum	214	1591	395	1196	25	6753198000
Minimum	19,6	845	36,2	809	4	618517200
Ecart	194	745	359	387	21	6134680800
STATION DE KIDIRA	Qm ³ /s	Pmm	Qmm	DE mm	CE %	Vm ³ /an
Période (ans)	47	47	47	47	47	47
Moyenne	128	1040	140	900	13	4039296000
Ecart-type	66	149	72,6	35	77	
Coefficient de variation	0,52	0,14	0,52	0,52	87	0,52
Maximum	281	1328	307	1021	23	8867517000
Minimum	32,6	721	35,6	685	5	1028758200
Ecart	248	606	271	336	18	7838758800

Comme à Fadougou, la lame d'eau moyenne écoulée connaît une grande variabilité avec un coefficient de variation de 0,54 à Gourbassi et 0,52 à Kidira. A Gourbassi, la lame écoulée maximale est de 395 mm contre 36,2 mm pour le minimum, soit un écart de 359 mm, alors que la moyenne s'établit à 190 mm. Pour Kidira, le maximum est de 307 mm, le minimum de 36,5 mm et la moyenne de 140 mm (Tableau 80 et Figure 55). Les écarts entre le maximum et le minimum sont très élevés : 359 mm à Gourbassi et 271 mm à Kidira. Le nombre d'années aux lames d'eau supérieures à la moyenne est de 23 années sur un total de 54 à Gourbassi (soit 42,6 %) et de 20 années à Kidira sur 47 (soit 42,6 %).

Comme les lames d'eau écoulées, les volumes d'eau annuels montrent aussi une grande variabilité aux stations de Gourbassi et Kidira avec un coefficient de variation élevé : 0,54 à Gourbassi et 0,52 à Kidira.

A Gourbassi, le volume moyen annuel écoulé est de 3 238 086 644 m³ pour un maximum de 6 747 958 984 m³ et un minimum de 621 150 316 m³. L'écart entre le maximum et le minimum est très élevé : 6 126 808 668 m³.

A Kidira, les volumes annuels écoulés sont légèrement moins variables que Gourbassi, le volume moyen annuel écoulé étant de 4 037 109 015 m³, ce qui est très élevé. Le volume maximal écoulé est de 8 855 923 073 m³ et le volume minimal écoulé de 1 030 452 397 m³, soit un écart de 15 131 390 146 m³ confirmant la variabilité.

Par rapport au volume moyen, 31 années sur un total de 54 (soit 57,4 %) et 27 années sur 47 (soit 57,4 %) ont enregistré des volumes écoulés inférieurs à la moyenne respectivement à Gourbassi et Kidira. Les mêmes fréquences obtenues aux stations de Gourbassi et Kidira, en lames et volumes d'eau écoulés, par rapport à la moyenne, témoignent de la stabilité du régime tropical pur.

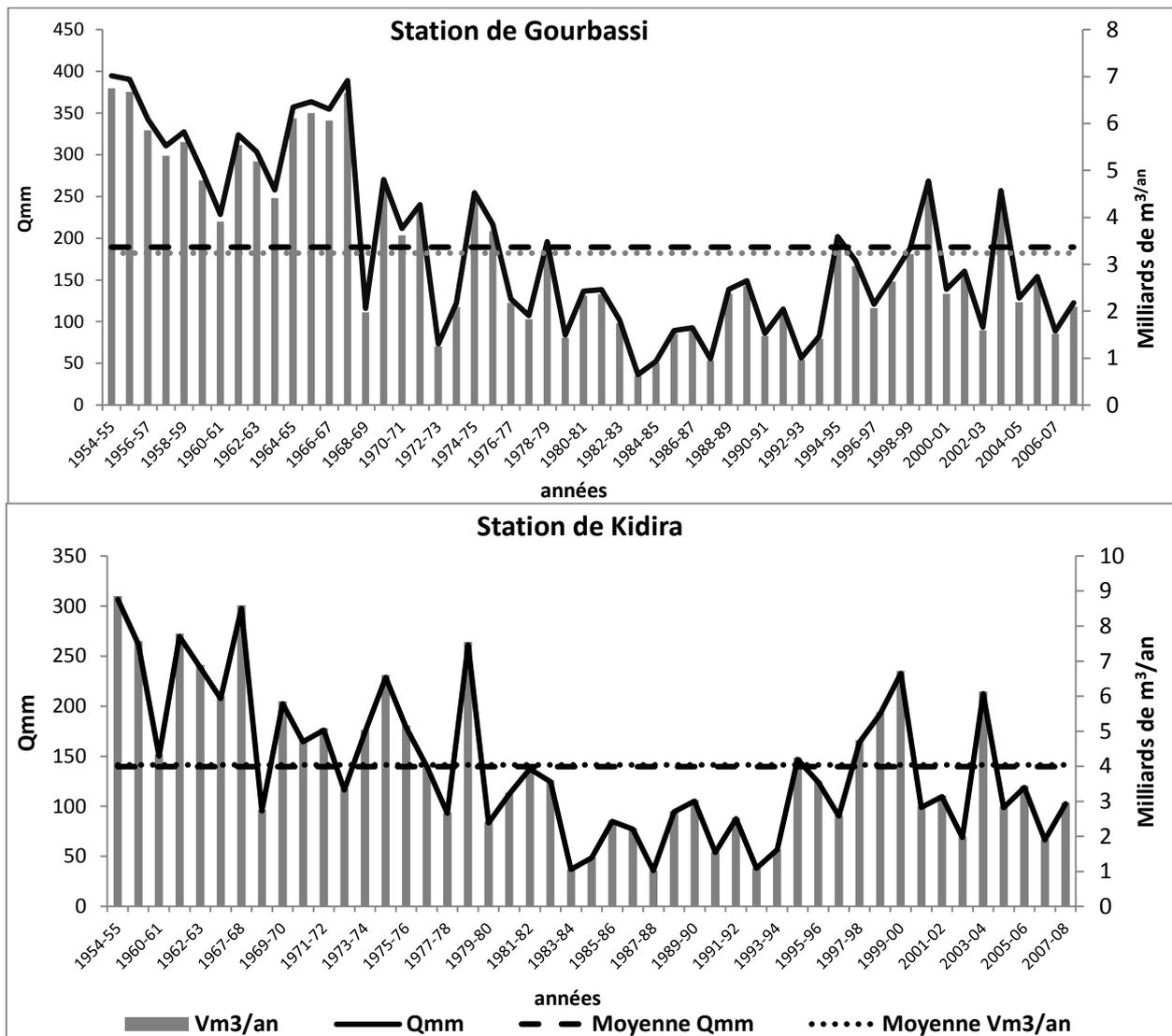


Figure 55 : Evolution annuelle de la lame d'eau écoulee et du volume à Gourbassi et Kidira (1954-2008)

Les disponibilités en année moyenne varient d'un mois à l'autre et le maximum est noté, contrairement à Fadougou, en septembre qui enregistre 35,7% à Gourbassi et 43 % à Kidira du volume moyen annuel, suivi de près par le mois d'août avec 28,7% à Gourbassi et 30,8 % à Kidira du même volume.

Sur une pluie moyenne de 1263 mm à Gourbassi et 1040 mm à Kidira, les pertes d'eau sont très élevées et estimées à 1074 mm à Gourbassi et 900 mm à Kidira, du fait de l'importance de l'évaporation dans le bassin pour un coefficient d'écoulement très faible avec 15% à Gourbassi et 13% à Kidira.

VIII.2.2 Le bilan en année du débit moyen le plus élevé

Le **Tableau 81** donne les caractéristiques du bilan de l'eau en année du débit moyen le plus élevé 1954-55 et en année du débit moyen le plus faible 1983-84, pour les deux stations.

A Gourbassi, avec 214 m³/s en année du débit moyen le plus élevé 1954-55, la lame d'eau écoulee est de 395 mm (soit un écart de 205 mm par rapport à l'année moyenne) et le volume annuel de 6 748 704 000 m³. Le volume de cette année est 2,08 fois et 10,9 fois supérieur respectivement au volume moyen et au volume de l'année du débit moyen le plus faible. Le volume élevé de cette année s'explique par une importante pluie moyenne qui est de 2160 mm, seulement les pertes d'eau sont aussi importantes avec 1765 mm. Le coefficient d'écoulement, légèrement supérieur à la moyenne, est de 18%. Il est faible comparé à la quantité de pluie reçue dans le sous bassin de Gourbassi, une faiblesse liée au déficit. Néanmoins, la lame d'eau écoulee est élevée comparée à l'année du débit moyen le plus faible du fait de la valeur élevée de la pluie moyenne, ce qui est logique.

Tableau 81 : Caractéristiques du bilan en années extrêmes à Gourbassi et Kidira (1954-2007)

STATION DE GOURBASSI	1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	1983-84 l'année du module annuel le plus faible	Ecart entre années extrêmes
Qm ³ /s	214	19,6	194
Pmm	2160	833	1327
Qmm	395	36,2	358
DE mm	1765	797	969
CE %	18	4	14
Vm ³ /an	6748704000	619799040	6128904960
STATION DE KIDIRA	1954-55 l'année du module annuel le plus élevé	1983-84 l'année du module annuel le plus faible	Ecart entre années extrêmes
Qm ³ /s	281	33,7	247
Pmm	776	500	276
Qmm	307	36,9	270
DE mm	469	463	6
CE %	40	7	32
Vm ³ /an	8861616000	1030890240	7830725760

Pour l'année 1954-55, t(s) est égal à : 31 536 000 s, alors que pour l'année 1983-84, t(s) est égal à : 31 622 400 s (l'année étant bissextile)

A Kidira, avec 281 m³/s, l'année du débit moyen le plus élevé 1954-55 a la lame d'eau écoulee la plus faible avec 307 mm et le volume annuel le plus élevé avec 8 861 616 000 m, des trois stations du bassin du fait de sa position aval et donc de l'augmentation de la taille du bassin et du débit écoulee. Le volume de l'année du débit moyen le plus élevé est 2,19 fois supérieur au volume de l'année moyenne. En 1954-55, la pluie moyenne est la plus faible avec 776 mm comparée à Fadougou et Gourbassi, ce qui est tout de même normal, alors que le déficit d'écoulement est de 469 mm pour un coefficient d'écoulement, de 40 %, largement supérieur à la moyenne qui est de 17 %. Ce coefficient d'écoulement élevé de l'année du débit moyen le plus élevé s'explique par les conditions de l'année précédente (1953-54) marquée par une bonne pluviométrie (1500 mm à Labé ; 1566 mm à Tougué ; 1196 mm à Kédougou ; 826 mm à Tambacounda...) qui a saturé l'atmosphère et diminué l'évaporation. A cela, s'ajoute le début précoce de cette année pluvieuse (mars à Labé avec 4 mm et Tougué avec 9 mm ; mai à Kédougou avec 32,7 mm et Tambacounda avec 2,2 mm). Cette valeur élevée du coefficient d'écoulement confère à l'année 1954-55 le débit moyen le plus élevé, malgré une pluie moyenne reçue peu importante.

VIII.2.3 Le bilan en année du débit moyen le plus faible

A la station de Gourbassi, en année du débit moyen le plus faible 1983-84, avec $19,6 \text{ m}^3/\text{s}$, la lame d'eau écoulée est de 36,2 mm, soit un écart de 358 mm par rapport à l'année du débit moyen le plus élevé (ce qui est très élevé). Par rapport à l'année 1954-55, le volume annuel écoulé est de $619\,799\,040 \text{ m}^3$ (soit un écart de $6\,128\,904\,960 \text{ m}^3$) et la pluie moyenne de 833 mm (soit un écart élevé avec 1327 mm). Les pertes d'eau, de 797 mm, sont importantes comparées à la pluie moyenne, ce qui entraîne un coefficient d'écoulement très faible avec 4 % (soit un écart de 14% par rapport à l'année 1954-55).

Pour la station de Kidira, avec $33,7 \text{ m}^3/\text{s}$, l'année du débit moyen le plus faible 1983-84 enregistre la lame d'eau écoulée la plus faible de toute la série et des trois stations avec 36,9 mm. Ainsi son écart, de 270 mm, est très élevé par rapport à l'année du débit moyen le plus élevé. Le volume annuel écoulé, de $1\,030\,890\,240 \text{ m}^3$, connaît un grand écart de $7\,830\,725\,760 \text{ m}^3$ comparé à l'année 1954-55. Sur cette année, la pluie moyenne, estimée à 500 mm, est très faible, soit 276 mm de moins que l'année du débit moyen le plus élevé. Ainsi, avec un déficit d'écoulement, de 463 mm, assez proche de la pluie moyenne, le coefficient d'écoulement demeure très faible avec 7 % (soit un écart de 32 % par rapport à l'année 1954-55).

Dans le bassin de la Falémé, la principale caractéristique par rapport aux disponibilités en eau, se trouve dans la différence de volume entre les années du débit moyen le plus élevé aux volumes importants et les années du débit moyen le plus faible aux volumes réduits. On en déduit, en définitive, avec Dione (1996) que les volumes d'eau écoulés peuvent être exceptionnellement forts en période de hautes eaux. Par contre, en période de basses eaux, les eaux de surface peuvent être très insignifiantes. Le volume annuel disponible augmente du Sud au Nord du bassin, de Fadougou à Kidira, avec la taille du bassin, contrairement à la lame d'eau reçue qui connaît une diminution latitudinale Nord-Sud.

Les grandes fluctuations de volumes d'eau à l'échelle annuelle constituent un enjeu aux tentatives d'aménagement du bassin, surtout dans un contexte de pré-barrage. Du fait de cette grande variabilité des disponibilités en eau, la mise en eau éventuelle du barrage de Gourbassi devrait répondre à ce double objectif, par le stockage de ces énormes quantités d'eau disponibles en période de hautes eaux et son utilisation pour le soutien des étiages.

Conclusion partielle

L'analyse montre que la lame d'eau écoulée diminue de Fadougou à Kidira, inversement à la taille du bassin. Elle dépend de la position de la station sur le cours d'eau : plus la station est en aval, plus la lame d'eau écoulée est faible.

Par rapport aux volumes d'eau écoulés, la situation est inverse, les volumes étant plus importants en régime tropical pur qu'en régime de transition du fait de l'augmentation de la taille du bassin. Les volumes maximaux peuvent être énormes : 5 644 944 000 m³ en année du débit moyen le plus élevé 1958-59 à Fadougou ; 6 748 704 000 m³ en année du débit moyen le plus élevé 1954-55 à Gourbassi ; 8 861 616 000 m³ en année du débit moyen le plus élevé 1954-55 à Kidira.

Du fait de la position géographique, la pluie moyenne diminue du Sud au Nord du bassin de même pour le déficit d'écoulement qui est de 1210 mm à Fadougou, 1073 mm à Gourbassi et 900 mm à Kidira et le coefficient d'écoulement passe de 19% à Fadougou, 15% à Gourbassi et 13% à Kidira. L'analyse du bilan hydrologique du bassin montre la grande variabilité de l'indice d'écoulement et de la lame d'eau écoulé. Ainsi en années de débit élevé, la disponibilité en eau est très importante dans le bassin contrairement aux années de débit faible.

L'étude de la disponibilité montre des déficits d'écoulement supérieurs à 50 % et la variabilité extrême est une des principales caractéristiques du cours d'eau. Pour caractériser la variabilité hydroclimatique dans le bassin, une modélisation des fonctions pluie-débit a été appliquée avec le modèle GR2M pour la simulation et la prévision hydrologique.

Les déficits pluviométriques climatiques ont de fortes répercussions sur les ressources en eau, et comme les modèles de circulation générales génèrent des séries temporelles de variables climatiques, il est possible d'intégrer ces données au sein des modèles hydrologiques sans préjuger ici de la qualité des séries. Les modèles pluie et débit sont des modèles particulièrement adaptés pour évaluer la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau dans le bassin de la Falémé. Le modèle GR2M est utilisé ici pour caractériser la variabilité climatique et ses impacts actuels sur les ressources en eau de surface du bassin. Quatre séries de données sont utilisées dans le modèle GR2M appliqué au bassin de la Falémé.

IX.1 Les données utilisées dans la modélisation

Les séries de données utilisées avec le modèle GR2M, sont globalement des données pluviométriques, hydrologiques, d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de capacité en eau du sol (WHC).

▪ Les données pluviométriques

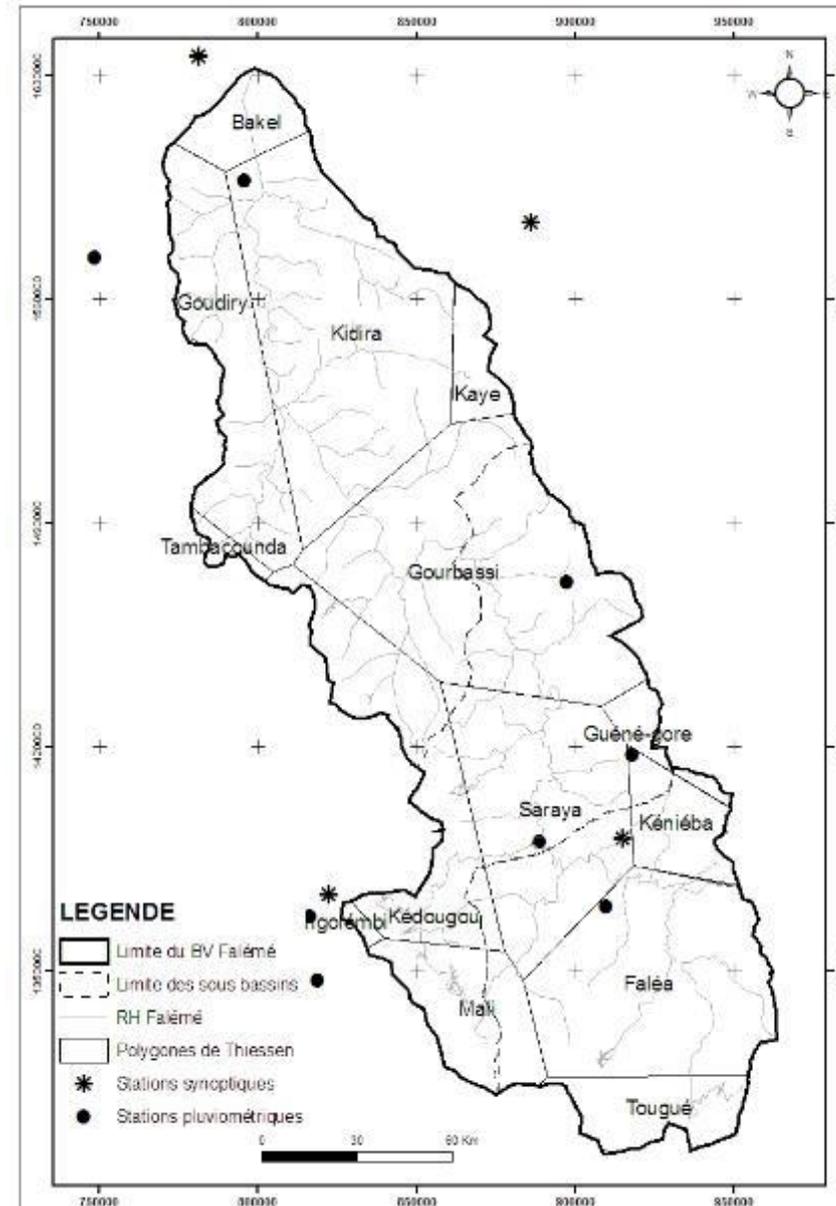
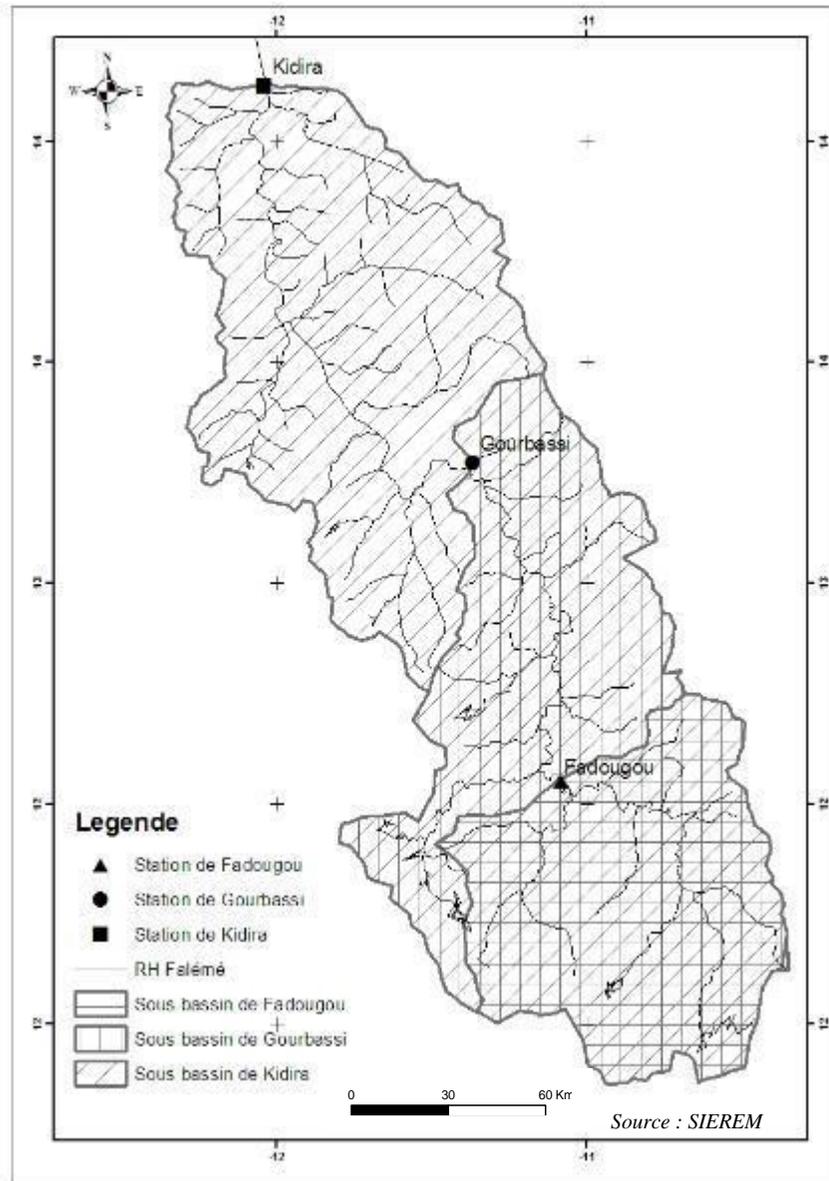
Elles permettent d'estimer la pluie moyenne reçue par le bassin, en partant des totaux enregistrés au niveau d'un minimum de poste de mesure, en fonction de la superficie (**Carte 22** et **Tableau 82**) et en respectant un critère de densité minimale acceptable (Schaake et al., 2006). Ce critère ne tient pas compte de la physiographie du bassin versant, mais est assez sélectif pour être utilisé sur la plupart des bassins (Oudin, 2004; Mathevet, 2005).

De nombreuses méthodes ont été élaborées pour passer de la pluie ponctuelle du réseau de pluviomètres sur le bassin versant à une pluie unique représentative de la quantité moyenne de pluie uniformément reçue par le bassin. La difficulté d'extrapolation des pluies ponctuelles vers la pluie de bassin a été identifiée par les hydrologues dès le début du XXème siècle. Les premières publications de Thiessen (1911) et Horton (1923) en témoignent. Plusieurs méthodes sont utilisées pour construire une pluie moyenne de bassin, avec d'innombrables variantes (une liste plus exhaustive est présentée à la revue de Singh et Chowdhury, 1985⁶⁵).

Tableau 82: Nombre de pluviomètres nécessaires pour une description acceptable de la pluie de bassin en fonction de la surface du bassin (Schaake (2000) d'après Oudin (2004)).

Superficie du bassin (km ²)	0 -50	50 -200	200 -500	500-1200	1200-2000	2000-3000	3000-6000	6000-10000
Nb. de stations pluviométriques	2	3	4	5	6	7	8	9

⁶⁵ Singh, V. P. et P. K. Chowdhury, 1985: "Comparing Some Methods of Estimating Mean Areal Rainfall." Water Resources Bulletin 22(2): 275-283.



Carte 22: Sous-bassins contrôlés par les stations hydrométriques et polygones de Thiessen appliqués au bassin de la Falém

La méthode des polygones de Thiessen, qui est probablement la plus utilisée dans cette catégorie, a été aussi choisie pour cette étude. Les calculs avec Hydraces ont permis d'obtenir la pluie moyenne de chacun des sous-bassins de la Falémé à partir des stations du **Tableau 83** qui ont permis l'établissement de polygones de Thiessen (**Carte 22**).

Tableau 83: Stations utilisées pour déterminer la pluie moyenne des sous-bassins de la Falémé

Sous-bassins		Synthèse du bassin		Stations concernées	Total
Noms	Superficie	Noms	Superficie		
Fadougou	9300	Fadougou	9300	Mali, Labé, Tougué, Faléa, Saraya, Kéniéba	6
Gourbassi	7800	Fadougou + Gourbassi	17100	Mali, Labé, Tougué, Faléa, Kédougou, Guéné-gore, Kéniéba, Fongolimbi, Saraya, Gourbassi	10
Kidira	11800	Fadougou + Gourbassi + Kidira	28900	Mali, Labé, Tougué, Faléa, Kédougou, Guéné-gore, Kéniéba, Fongolimbi, Saraya, Gourbassi, Tambacounda, Goudiry, Kayes, Kidira, Bakel	15

▪ Les données d'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est un des termes majeurs du bilan hydrologique en relation directe avec le climat, le sol ou encore la végétation. L'analyse des données d'ETP, calculées avec la feuille (GD Chirico 4,0, 2003), selon la méthode de Penman-Monteith-FAO, est faite aux stations de Kédougou et Bakel. Celles de la station synoptique de Kédougou, sont retenues et servent pour la modélisation aux stations hydrométriques de Fadougou et Gourbassi et celles de Bakel pour la modélisation à la station hydrométrique de Kidira (station qui contrôle tout le bassin).

▪ Les données hydrologiques et les données de Capacité en Eau des sols

Les données hydrologiques correspondent aux débits mesurés à l'exutoire, et qui conditionnent les périodes utilisées dans les phases de calage et de validation. Les données utilisées ici proviennent des stations de Fadougou qui contrôle le haut bassin, de Gourbassi dans le bassin moyen et de Kidira, dans le bassin inférieur, qui contrôle tout le bassin.

Tableau 84 : Caractéristiques des stations hydrologiques et données de FAO Smax sur le bassin de la Falémé
(Source SIEREM/hydro sciences)⁶⁶

Stations	Latitude	Longitude	Années d'observation	Module moyen	Années de rupture selon Pettit	Variations de l'écoulement en%	Moyenne FAO Smax par sous-bassin
Kidira	14° 27'N	12° 13' O	1955-2008	158,6	1971	50,83	86,3
Gourbassi	13° 24'N	11° 38' O	1955-2008	102,6	1971	56,40	75,1
Fadougou	12° 31'N	11° 23' O	1955-2007	84,1	1971	59,30	62,1

Parmi les paramètres nécessaires pour le calage du modèle, on retient les valeurs de la capacité en eau des sols (**Tableau 84**). Ardoin (2004), se fondant sur les résultats en termes de meilleurs calages pour l'ensemble des données sur 41 bassins, a montré pour 86,5 % des cas la qualité de la valeur Smax avec les données de Water Holding Capacity (Capacité en Eau des sols). Elle a montré que parmi les

⁶⁶ SIEREM : Système d'Informations Environnementales pour les Ressources en Eau et leur Modélisation) à l'UMR HydroSciences Montpellier Mai 2005

différentes grilles fournis par la FAO, Smax conduit aux valeurs du critère les plus élevées pour la majorité des cas, et cela, quelque soit le modèle considéré. Les valeurs Smax pour la donnée "sol" A utilisée, provient de la carte "Soil Map of the World" fournie par la FAO (FAO/UNESCO, 1974-1981).

Le bassin de la Falémé est caractérisé par une forte disparité des valeurs de FAO Smax (19 valeurs différentes) dont le minimum est de 20 mm et le maximum de 158 mm. Les valeurs moyennes de Smax, utilisées pour la méthode d'optimisation du modèle GR2M, varient d'un sous-bassin à l'autre, 62,1 mm dans le sous-bassin de Fadougou, 75,1 mm pour le sous-bassin de Gourbassi et 86,3 mm pour le bassin total contrôlé par Kidira. Ces valeurs de Smax moyennée sont utilisées dans la méthode d'optimisation du modèle.

Il existe de nombreuses sources d'incertitudes, au moins une pour chaque source de données, pour chaque modèle d'un processus hydrologique et hydraulique ainsi que pour chaque paramètre en cause. Selon William D. *et al* (2004)⁶⁷, trois principales sources d'incertitudes peuvent être identifiées : les données enregistrées, les données théoriques et le processus de modélisation. Ainsi, il est important de rappeler que, malgré tout le soin apporté à la construction du modèle, il garde un certain nombre d'incertitudes que le calage avec des données observées ne parvienne pas totalement à éliminer. Les incertitudes liées aux données enregistrées peuvent être subdivisées en différentes sources d'erreurs, mais nous nous intéressons particulièrement à celles liées aux précipitations et aux débits.

IX.2 La critique de données

L'emplacement des stations peut être une source majeure d'incertitude. Idéalement, les pluviomètres devraient se situer aussi près que possible de la zone d'étude afin d'être représentatifs de la pluie réelle dans le bassin (William D., *et al* 2004). Les résultats du modèle GR2M ne reflètent pas correctement, avant calibration, les données des débits observés. Bien que l'emplacement à proximité de la zone d'étude soit important, la variation spatiale des précipitations dans le bassin très vaste (28 900 km²) a une forte influence sur les résultats du modèle. La méthode des polygones de Thiessen, utilisée pour rendre compte de cette variation des précipitations, a besoin de stations ayant une bonne répartition spatio-temporelle des données, ce qui n'est toujours pas le cas.

En général, les débits sont calculés à partir des courbes d'étalonnage, la hauteur de l'eau étant lue à partir des échelles limnimétriques. Des erreurs peuvent y être introduites à la lecture et aussi dans l'établissement de la courbe d'étalonnage. On peut noter des différences entre les débits de pointe instantanée et les débits moyens journaliers. Dans cette étude, les débits moyens mensuels enregistrés ont été comparés avec les résultats du modèle.

⁶⁷ William D. *et al*, 2004: Modeling water quantity and water quality with the SWMM continuous stream flow model under non-stationary land-use condition using GIS, Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 161 p.

Au-delà des pluies et des débits, les données d'évapotranspiration potentielle peuvent connaître des incertitudes surtout quand elles sont calculées (ce qui est le cas dans cette étude). Il en est de même pour des données de S_{max} qui peuvent ne plus traduire la réalité avec les modifications de l'occupation du sol dans le bassin. Seulement, l'ETP comme le S_{max} sont moins influents sur les résultats du modèle.

IX.3 Les méthodes de découpage et le choix des périodes de Calage/Validation

Il est question ici de découper, en fonction des données d'entrée du modèle dont nous disposons (de 1981 à 2008), des sous-périodes (2 au minimum) plus ou moins opposées sur lesquelles, seront effectués le calage et la validation du modèle.

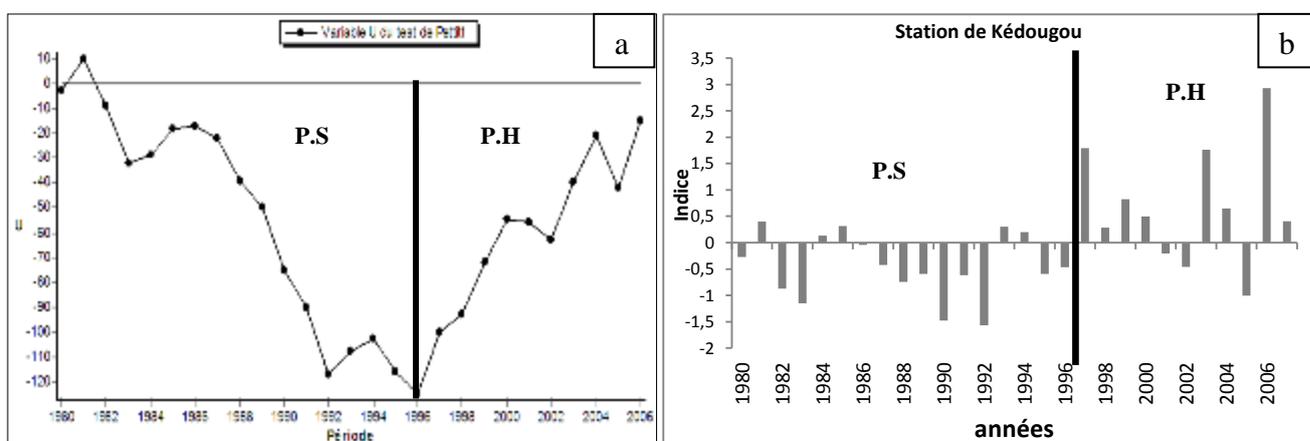


Figure 56 : Evolution des précipitations à Kédougou de 1980 à 2008 : (a) Test de rupture de Pettitt ; (b) Indice d'anomalie pluviométrique de Lamb (PS : Période Sèche et PH : Période Humide)

L'indice d'anomalie pluviométrique, calculé, selon la méthode de Lamb et appliqué à la station de Kédougou, et les applications faites avec le logiciel Khronostat permettent de noter deux périodes plus ou moins opposées : une considérée comme sèche (de 1981 à 1994) et une autre comme humide (de 1995 à 2008), (Figure 56).

Un premier calage du modèle a été fait sur la période sèche pour une validation sur la période humide (Découpage 1), un second calage sur la période humide a été validé sur la période sèche (Découpage 2).

Trois méthodes (étapes) sont appliquées à ces deux périodes (les résultats de l'effet de la période sur le calage, sont donnés dans l'annexe 4) :

- 1ère étape : $A = S_{max} - x1$ et $x2$ à caler.
- 2ème étape : $A - x1$ et $x2$ à caler.
- 3ème étape : A fixé à 200 - $x1$ et $x2$ à caler.

Dans le but d'étudier l'effet de la période sur le calage, ces trois méthodes sont appliquées sur les deux sous-périodes (1981-1994 et 1995-2008) dans les trois sous-bassins de la Falémé et tester avec les trois critères de performances suivantes.

- Le **Nash (Q)** utilisé pour les débits de pointe (crues) ;
- Le **Nash (ln(Q))** (logarithme népérien des débits) utilisé pour les débits de base (étiages) ;
- Le **Nash(\sqrt{Q})** (racine carré des débits) utilisé pour les débits moyens.

Après l'analyse des valeurs de Nash des différentes méthodes utilisées, sur les deux sous périodes, dans les trois sous bassins, les combinaisons qui donnent les meilleurs résultats sont choisies :

- Pour les méthodes d'optimisation, la première méthode a été retenue, c'est-à-dire en faisant varier les deux (2) paramètres (X1-X2) tout en fixant A à la valeur moyenne issue de la FAO Smax du bassin (*1ère étape : A = Smax - x1 et x2 à caler*).
- Pour les méthodes de découpage et le choix des périodes de Calage/Validation, la sous-période **1981-1994** (période sèche) est retenue comme **période de calage** et la sous-période **1995-2008** (période humide) étant utilisée pour **valider et tester le modèle**.
- Pour les critères de performances de l'analyse des résultats du modèle, **le critère de Nash(\sqrt{Q})**, retenu s'explique par le fait que, l'écoulement moyen est privilégié dans le contexte actuel de la mise en œuvre d'une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) au Sénégal en général et dans le bassin de la Falémé en particulier.

IX.4 Les performances du modèle GR2M

Le calage a été effectué sur la période 1981-1994, suivi de la validation sur la période 1995-2008. Le **Tableau 85** présente les résultats de simulations des écoulements mensuels effectuées au niveau des trois stations retenues.

Tableau 85: Résultats des calages (1981-1994) et des validations (1995-2008) du modèle GR2M

Critères de performances	X1			X2			Calage			Validation		
	NQ	N \sqrt{Q}	NlnQ	NQ	N \sqrt{Q}	NlnQ	NQ	N \sqrt{Q}	NlnQ	NQ	N \sqrt{Q}	NlnQ
Fadougou	6,25	6,39	6,65	0,47	0,51	0,55	57,3	72,3	76,9	53,2	64	76,6
Gourbassi	6,71	6,56	6,52	0,65	0,60	0,58	89,7	94,6	96,1	61,5	73,5	75,6
Kidira	7,07	6,41	6,51	0,72	0,58	0,55	62,1	82,6	89	53,2	69,8	68,8
Moyenne	6,48	6,45	6,56	0,61	0,56	0,56	69,7	83,2	87,3	56	69,1	73,7
Ecart type	0,33	0,09	0,08	0,13	0,05	0,02	17,49	11,2	9,71	4,79	4,79	4,24
CV	0,05	0,01	0,01	0,21	0,08	0,03	0,25	0,13	0,11	0,09	0,07	0,06

NQ : débits de pointe (crues) ; N (\sqrt{Q}) : débits moyens ; Nln Q : débits de base (étiages)

Les calages avec le modèle GR2M sont de bonne qualité (**Tableau 85**), la performance moyenne des critères de Nash, quelque soit le Nash, sont partout supérieurs de 60% (sauf Nash Q avec 57,2 %).

La simulation des débits de pointe (NQ) est très satisfaisante à la station de Gourbassi (89,7 %) comme le montre la **Figure 57**. En revanche, pour la station de Kidira, la valeur de Nash Q reste tout juste satisfaisante avec 62,1 % et moins à la station de Fadougou où la valeur de Nash Q est de 57,3 %. La moyenne atteint de même 69,7 %.

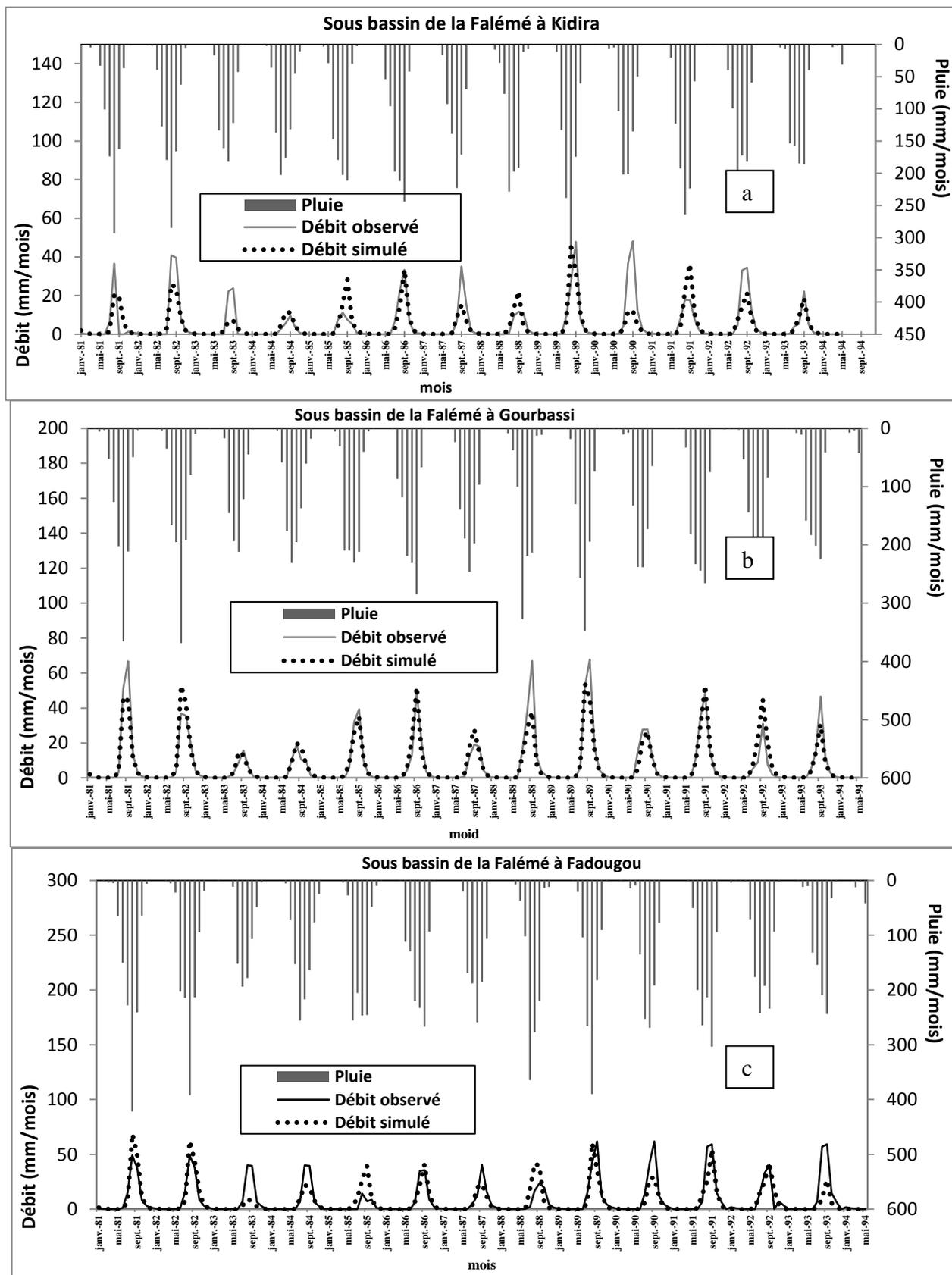


Figure 57 : Hydrogrammes observés et simulés en phase de calage par le modèle GR2M (1981-1994)

La simulation des débits faibles ($N\ln Q$), contrairement aux débits de pics (Q), donne de bons résultats aux trois stations du bassin avec 96,1 % à la station de Gourbassi, 89 % à Kidira et de 76,9 % à Fadougou. La moyenne est de 87,3 %.

La simulation des débits moyens $N\sqrt{Q}$, (les plus utilisés en GIRE) donne aussi de bons résultats avec 94,6 % à Gourbassi, 82,6 % à Kidira et 72,3 % à Fadougou. La moyenne est de 83,2 %.

Le modèle GR2M satisfait efficacement pour la simulation des débits moyens et des faibles débits d'étiages sur l'ensemble du bassin à l'échelle mensuelle. En revanche, les faibles performances du modèle à la station de Kidira, pour les débits de pointe de crue, peuvent s'expliquer par le remous entraîné par la confluence de la Falémé avec le fleuve Sénégal. Pour la station de Fadougou, on doit évoquer la faible couverture de ce sous-bassin en postes pluviométriques, d'où une valeur moyenne mal exprimée.

Les lames d'eau moyennes mensuelles calculées reproduisent les variations saisonnières de manière satisfaisante sur l'échantillon de calage. Cependant, elles varient en fonction des années et des stations.

A la station de Kidira, les crues ont été bien simulées en 1985, 1989 et 1994, c'est le cas pour la station de Gourbassi pour toutes les années de la série à l'exception de 1981, 1982 et 1993. A la station de Fadougou, seules les crues des années 1986, 1987 et 1993 ont été mal simulées. Les débits les plus élevés de la période des hautes eaux sont ainsi estimés avec des incertitudes plus fortes que les faibles débits.

Les performances en validation sont jugées en fonction du même critère que pour le calage. La performance moyenne obtenue de Nash Q est de 56 %. Les valeurs du critère de Nash Q en dehors de la station de Gourbassi (61,5 %) restent inférieures à 60% avec la même valeur, 53,2 % pour les stations de Kidira et Fadougou (**Tableau 85**). Cela s'explique par le fait que les pointes de crues sont difficilement reproduites en raison de l'apparition brutale des crues. Le modèle GR2M sous-estime généralement les pointes de crue (Kouassi A. M., 2007).

Le Nash \sqrt{Q} retenu présente des valeurs plus fortes pour la validation avec 73,5 % à Gourbassi, 69,8 % à Kidira et 64 % à Fadougou, soit une moyenne de 69,1 %. Cela témoigne des performances du modèle à simuler les débits moyens dans le bassin de la Falémé. Il en est de même pour les débits faibles avec un Nash $\ln Q$ qui totalise 75,6 % à Gourbassi, 68,8 % à Kidira et 76,2 % à Fadougou, soit une moyenne de 73,6 %.

La forme des hydrogrammes calculés en phases de calage et de validation, est similaire et bien reproduite. Le modèle GR2M permet de reproduire les très faibles débits pour les années 1983 à 1985, correspondant à des années de forts déficits dus à la sécheresse (**Figure 58**). Cependant, les résultats

obtenus avec le modèle en validation de la période humide, pour simuler les écoulements de la période sèche, sont mal reproduits. Les valeurs du Nash Q, comprises entre 53,2 et 61,5 % dans l'ensemble du bassin, restent faibles (Tableau 86).

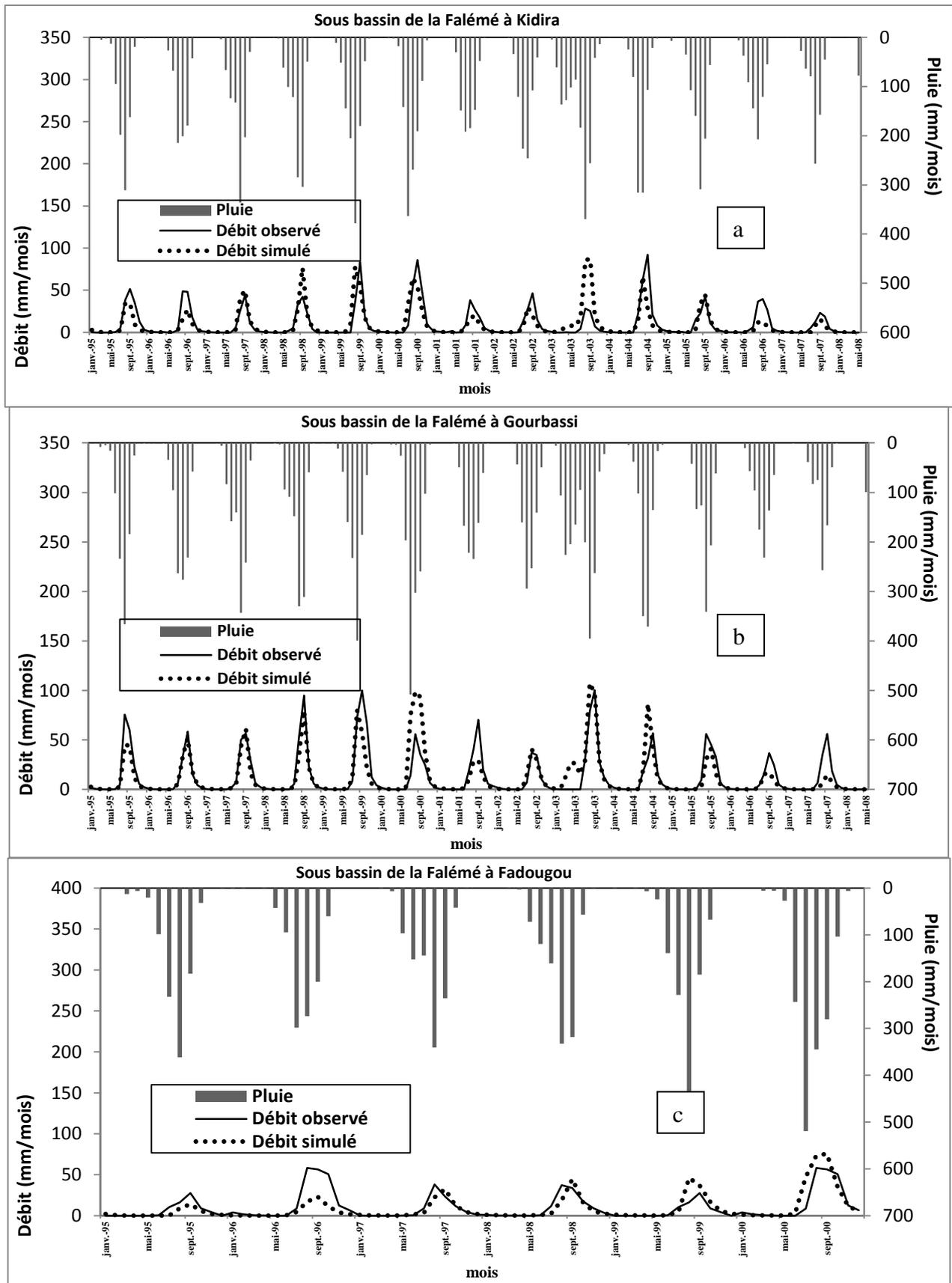


Figure 58 : Hydrogrammes observés et simulés en phase de validation par le modèle GR2M (1995-2008)

IX.5 Les débits moyens simulés en phase de calage et de validation

Le Tableau 86 montre le faible écart entre les débits observés et simulés, aussi bien pour le calage du modèle comme pour la validation, les débits simulés étant proches, par valeurs supérieures ou inférieures, aux débits observés.

Tableau 86: Débits moyens observés et simulés (mm) par le modèle GR2M

Descripteurs	Calage (en m ³ /s)			Validation (en m ³ /s)		
	Débit observé	Débit simulé	Ecart	Débit observé	Débit simulé	Ecart
Fadougou	8,68	7,87	0,81	10,2	8,85	1,35
Gourbassi	8,3	7,82	0,48	13,1	11,6	1,5
Kidira	5	4,55	0,45	10,1	8,86	1,24
Moyenne	7,33	6,75	0,58	11,1	9,77	1,33
Ecart type	2,02	1,9	-	1,7	1,58	-
CV	0,28	0,28	-	0,15	0,16	-

Le débit moyen simulé est de 6,75 mm en calage pour un débit moyen observé de 7,33 mm, alors qu'en validation, le débit moyen simulé est de 9,77 mm et le débit moyen observé de 11,1 mm. Ainsi on note une légère sous estimation de la lame d'eau écoulee aux stations du bassin.

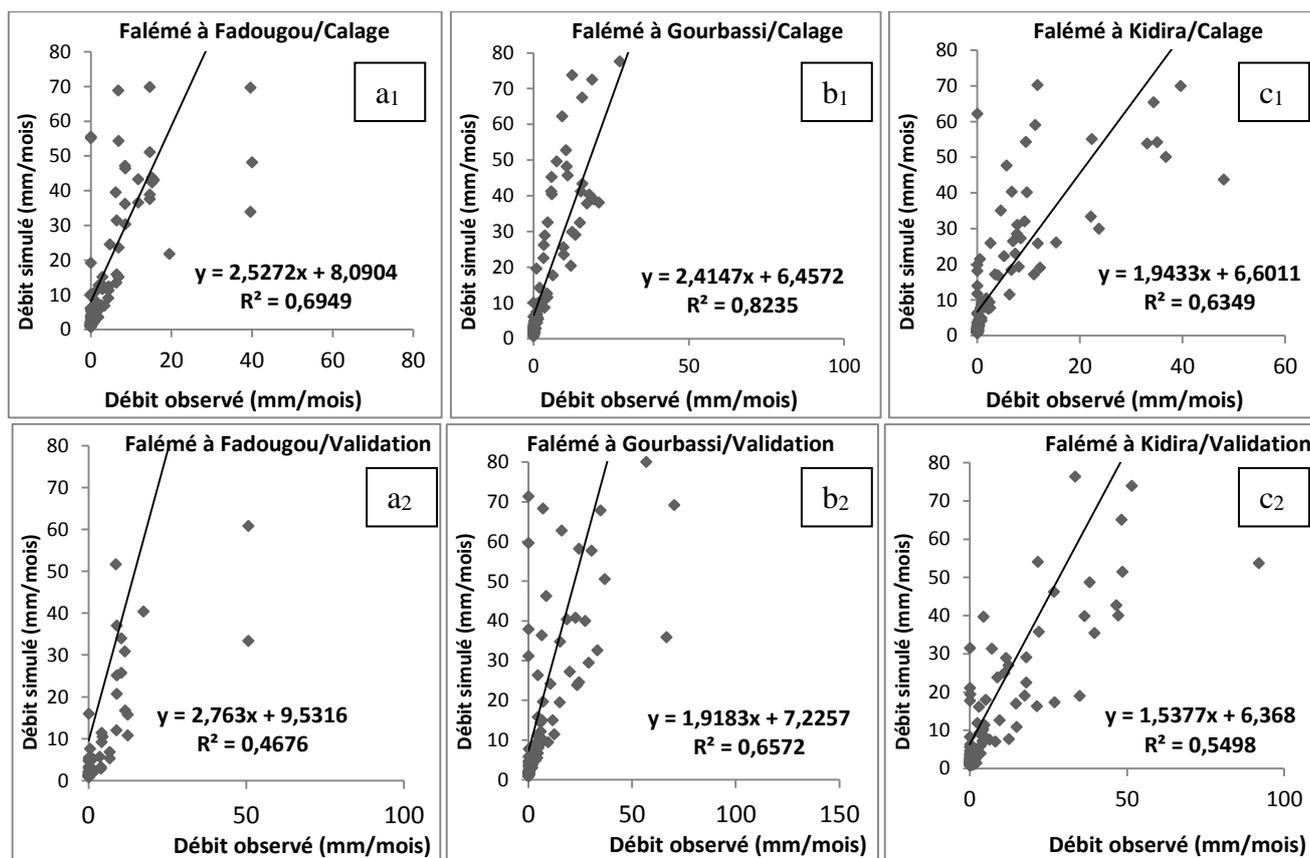


Figure 59 : Corrélation entre débits observés et débits simulés en calage et en validation par GR2M aux stations de Fadougou (a₁ : calage; a₂ : validation), Gourbassi (b₁ : calage; b₂ : validation) et Kidira (c₁ : calage; c₂ : validation)

Les performances du critère de Nash lors du calage sont partout supérieures à celles obtenues en phase de validation. Les meilleures performances sont en général obtenues au niveau du sous-bassin de

Gourbassi, c'est-à-dire dans le cours moyen du bassin. Les résultats obtenus à cette station témoignent de la bonne reconstitution des hydrogrammes observés, tant en phase de calage qu'en phase de validation, et cela aussi bien pour les débits extrêmes (crue et étiage). Pour les deux autres stations du bassin, Kidira (à la confluence avec le fleuve Sénégal) et Fadougou (station qui contrôle le haut bassin), les débits moyens et les faibles débits sont aussi bien simulés, comme le montrent les valeurs de Nash \sqrt{Q} et $\ln Q$.

La corrélation entre débits observés et débits simulés aux trois stations du bassin (**Figure 59**) révèlent de meilleurs coefficients de corrélation pour le calage que pour la validation. Cependant, les résultats obtenus montrent que le modèle GR2M est un modèle performant pour la simulation des débits mensuels. Les valeurs simulées sont proches de celles observées et attestent de la validité du modèle.

L'étude de la relation entre les débits observé et simulé pour les sous-périodes 1981-1994 et 1995-2008 (**Tableau 87**) présente des valeurs du coefficient de détermination acceptable dans tous les sous-bassins (souvent supérieures à 0,60, correspondant à un coefficient de détermination moyen de 0,72 en calage et 0,61 en validation). La station de Gourbassi présente le meilleur coefficient (0,88 en calage) et le plus faible (0,56 en validation) est noté à la station de Kidira.

Tableau 87: Corrélation entre débits observés et simulés en calage et validation

Stations	Coefficient de détermination en Calage	Coefficient de détermination en Validation
Fadougou	0,68	0,57
Gourbassi	0,88	0,69
Kidira	0,60	0,56
Moyenne	0,72	0,61
Ecart type	0,14	0,07
CV	0,20	0,12

Si les coefficients sont sur un intervalle de 0,5 à 1, la corrélation est jugée positive et forte.

Toujours dans l'optique de discerner la variabilité des écoulements du bassin avec le modèle, quatre années ont été choisies, au hasard, sur chaque station : deux sur la période de calage et deux sur la période de validation (**Figure 60**).

Ces différentes années choisies confirment l'évolution assez similaire entre les débits observés et simulés en calage de 1981 à 1994 et en validation de 1995 à 2008 sur toutes les stations, avec toutefois quelques différences prononcées aux stations de Kidira et Fadougou sur la saison pluvieuse (entre août et octobre). Sur toutes les stations, un retard des maxima des débits observés et simulés par rapport à ceux des pluies, est noté sur les deux sous-périodes. Ce qui se justifie par le temps de réponse des sous-bassins aux événements pluvieux. La **Figure 60** souligne un léger décalage entre les débits maximaux simulés et les débits maximaux observés aux stations de Fadougou et Kidira avec généralement un léger retard pour les débits simulés. Toutefois, ces différences ne remettent pas en cause l'efficacité du modèle à simuler les écoulements, d'autant plus que dans cette étude, la simulation des débits moyens est privilégiée.

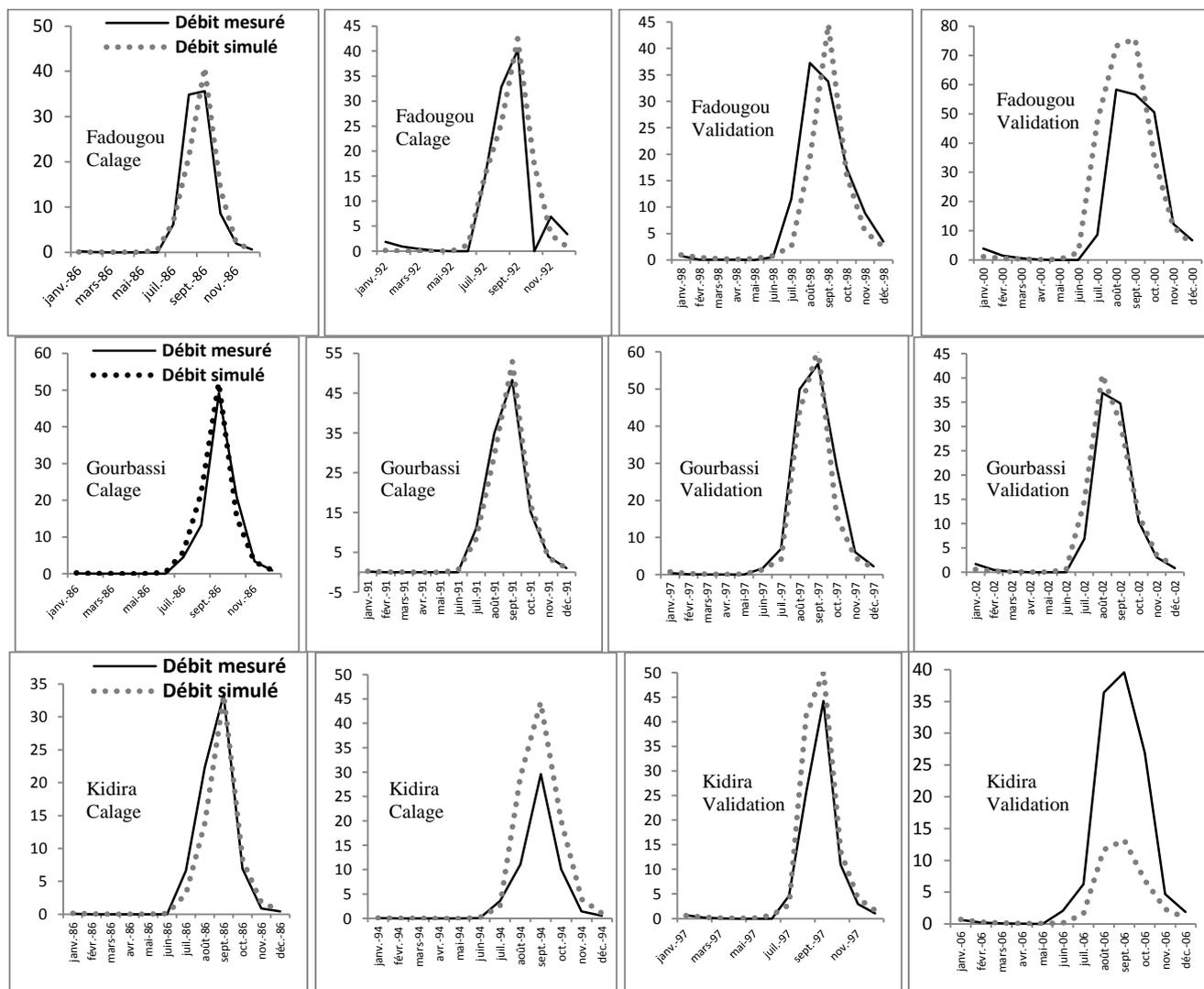


Figure 60 : Hydrogrammes observés et simulés en calage et validation à Fadougou (1986 ; 1992 ; 1998 ; 2000), Gourbassi (1986 ; 1991 ; 1997 ; 2002) et Kidira (1986 ; 1994 ; 1997 ; 2006)

IX.6 La robustesse du modèle GR2M

L'analyse des différentes performances (Tableau 88 et Tableau 89) montre d'abord que les performances en calage sont supérieures à celles en validation. Ensuite en calage, on remarque que les performances sur la période sèche 1981-1994 (83,2%) sont supérieures à celles de la période humide 1995-2008 (74,3%). Enfin en validation, on constate que les performances de la période humide 1995-2008 (74,8%) sont supérieures à celles de la période sèche 1981-1994 (70,5%).

Tableau 88: Synthèse des performances en calage (1981-1994 et 1995-2008) et en validation (1981-1994 et 1995-2008) du modèle GR2M

Descripteurs	Calage (%)		Validation (%)	
	Découpage 1	Découpage 2	Découpage 1	Découpage 2
	1981-1994	1995-2008	1995-2008	1981-1994
Fadougou	72,3	73	58,4	68
Gourbassi	94,6	75	73,5	93,1
Kidira	82,6	74,9	44,6	74,5
Moyenne	83,2	74,3	74,8	70,5
Ecart type	11,2	1,13	14,5	13
CV	0,13	0,02	0,19	0,18

Le **Tableau 89** montre la performance moyenne en calage, de 78,7 % et celles en validation, de 72,6 %. Les performances moyennes en calage sont donc supérieures à celle de la validation. Ces différentes valeurs montrent que les performances obtenues au niveau du modèle GR2M sont satisfaisantes.

Tableau 89: Performances moyennes et critère de robustesse du modèle GR2M (1981-2008)

Descripteurs	Performance moyenne (calage) %	Performance moyenne (validation) %	Performance moyenne %	Ecart de variation %
Fadougou	72,6	63,2	67,9	-9,4
Gourbassi	84,8	83,3	84	-1,5
Kidira	78,7	59,5	69,1	-19,2
Moyenne	78,7	72,6	75,7	-6,1
Ecart type	6,08	12,8	8,98	6,72
CV	0,08	0,18	0,12	0,1

Dans l'ensemble, les résultats obtenus avec le modèle GR2M sont satisfaisants. Les performances du critère de Nash sont généralement supérieures à 70% en calage et en validation et atteignent même 80%. Le modèle GR2M représente de façon satisfaisante la relation entre la pluie moyenne mensuelle estimée sur chaque sous-bassin et le débit moyen mensuel enregistré à son exutoire. Le faible nombre de paramètres permet une optimisation facile (Vissin E., 2007), d'où la robustesse du modèle.

L'application du modèle aux sous-bassins de la Falémé situés sous différents types de climat (exemple : Falémé à Fadougou en climat guinéen, Falémé à Gourbassi en climat soudanien et Falémé à Kidira en climat sahélien), montre que même si le modèle a été développé pour un type de climat particulier, les résultats sont également acceptables dans des contextes climatiques très différents, souvent éloignés de ceux pour lesquels, ils avaient été initialement conçus (Perrin, 2000 ; Le Lay, 2006).

Cependant, des limites persistent dans la modélisation de la relation pluie-débit et les incertitudes associées sont données au **Tableau 90**. Ces incertitudes en calage (1981-1994) et en validation (1995-2008), sont données par le rapport entre les débits observés pour chaque mois sur les débits simulés du mois.

Tableau 90: Incertitudes moyennes en phases de calage et de validation dans le bassin de la Falémé

Descripteurs	Incertainudes en calage	Incertainudes en validation
Fadougou	3,39	2,27
Gourbassi	0,75	1,36
Kidira	0,87	1,63
Moyenne	1,67	1,75
Ecart type	1,49	0,47
CV	0,89	0,27

En phase de calage, les valeurs d'incertitudes moyennes varient entre 0,75 (Gourbassi) et 3,39 (Fadougou) avec une moyenne de 1,67. Les incertitudes estimées oscillent entre 2,27 (Fadougou) et

1,36 (Gourbassi) en validation avec une moyenne de 1,75. La **Figure 61** montre généralement une faible sous-estimation des débits simulés par le modèle GR2M.

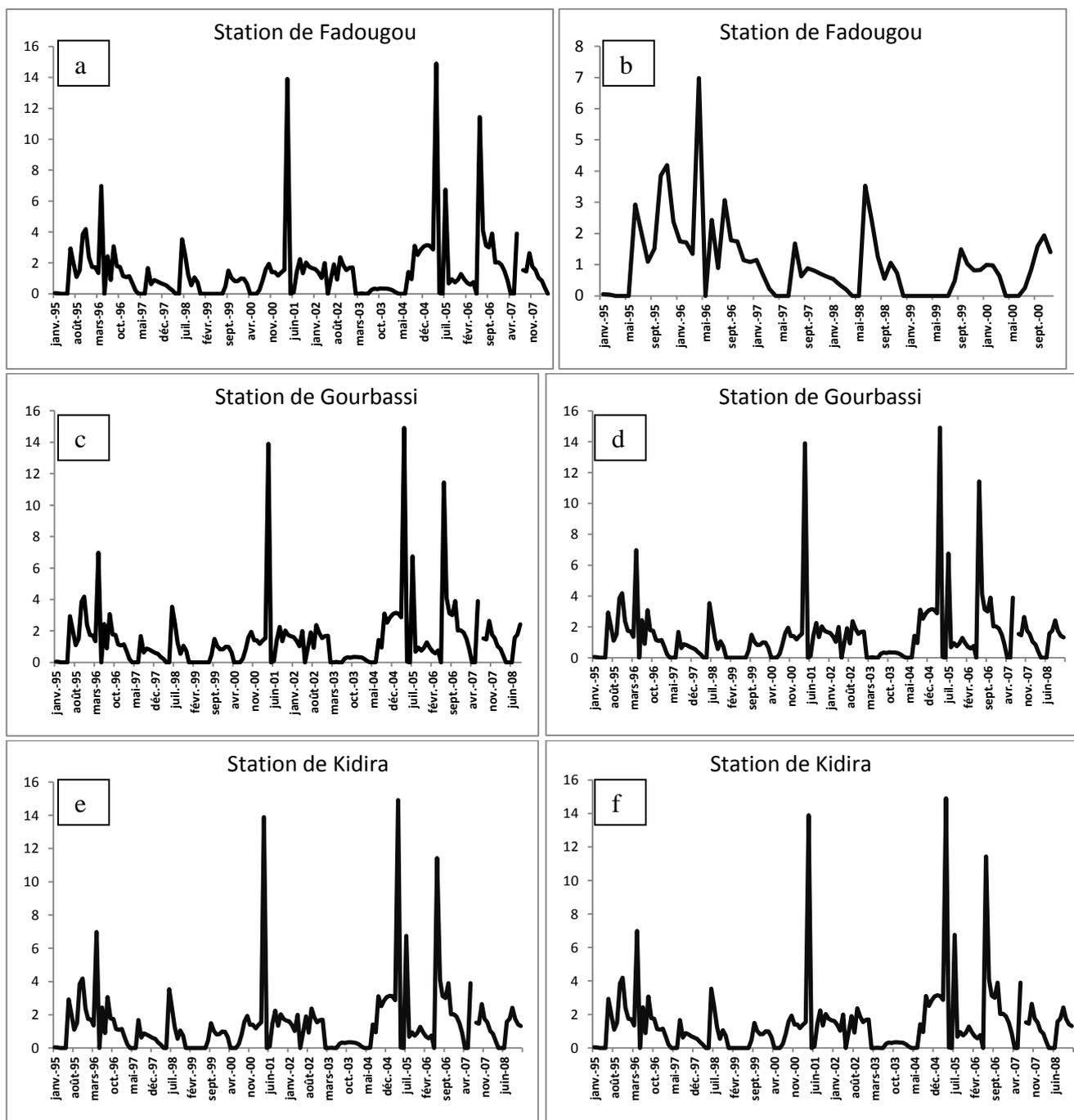


Figure 61 : Evolution des incertitudes aux stations de Fadougou (a : calage ; b : validation), Gourbassi (c : calage ; d : validation) et Kidira (e : calage ; f : validation)

Les erreurs tournent en général autour de 0 à 5 mm avec, cependant, quelques unes qui s'en éloignent. Les débits faibles sont, parfois deux fois sous-estimés ou surestimés. En revanche, les débits élevés le sont faiblement. Les débits simulés aux différents sous-bassins, malgré une certaine incertitude, sont dans l'ensemble acceptables. Une analyse de la variation des paramètres du modèle GR2M permet d'apprécier le rôle joué par les réservoirs souterrains dans la dynamique hydrologique du bassin.

IX.7 Les paramètres du modèle GR2M

Le modèle GR2M utilisé, de type conceptuel, est un modèle empirique et non à base physique intégrant seulement deux paramètres : $X1$ (capacité du réservoir de production) et $X2$ (coefficient d'échanges souterrains). Compte tenu du critère ($N\sqrt{Q}$) et des données utilisées, la capacité du réservoir de production ($X1$), avec une moyenne de 634 mm, varie de façon irrégulière. Elle peut augmenter tout comme diminuer, du Sud au Nord, avec la taille du bassin : 593 mm à Fadougou, 703 mm à Gourbassi et 605 mm à Kidira (Tableau 91). En plus, les valeurs de la capacité du réservoir de production sont souvent élevée, surtout si le critère Nash Q est considéré (818 mm à Gourbassi, 1172 mm à Kidira).

Tableau 91: Paramètres $X1$ et $X2$ du modèle GR2M

Critères de performances	Capacité de production ($X1$)			Paramètres d'échange ($X2$)		
	NQ	$N\sqrt{Q}$	NlnQ	NQ	$N\sqrt{Q}$	NlnQ
Fadougou	516	593	776	0,47	0,51	0,55
Gourbassi	818	703	679	0,65	0,60	0,58
Kidira	1172	605	875	0,72	0,58	0,55
Moyenne	835	634	777	0,61	0,56	0,56
Ecart type	328	60	98	0,13	0,05	0,02
CV	0,39	0,10	0,13	0,21	0,08	0,03

Les coefficients d'échanges souterrains $X2$ inférieures à 1, indiquent la présence d'apports d'eau au niveau des différents sous-bassins étudiés. Le paramètre $X2$ enregistre un minimum de 0,51 (à Fadougou) et un maximum de 0,60 (à Gourbassi) pour une moyenne de 0,56 (Tableau 91). Il connaît donc une baisse sensible dans tous les sous-bassins étudiés, en calage (1981-1994) comme en validation (1995-2008). L'écart entre le maximum et le minimum des valeurs de $X2$ dans le bassin, est également très faible (seulement 0,09), preuve que ce paramètre connaît une faible dispersion, contrairement au paramètre $X1$ dont l'écart est de 98 mm.

Dans le bassin, en calage comme en validation, les plus mauvaises performances du critère de Nash (station de Fadougou) ont été obtenues avec les plus faibles valeurs de $X1$ et de $X2$, alors que les meilleures performances (station de Gourbassi) sont réalisées avec les valeurs de $X1$ et de $X2$ les plus élevées. Le modèle GR2M semble être plus sensible aux variations de $X1$ que de $X2$ (Tableau 91).

Au même titre que la pluie, la capacité en eau du sol est une donnée essentielle pour le bon fonctionnement du modèle. En calage comme en validation, les retards et les avances (décalage) des hydrogrammes simulés s'expliquent, en grande partie, par la mauvaise simulation de la fin des saisons de pluies qui, dans le cas d'années déficitaires, est fortement sous-estimée. En revanche, sur les années excédentaires où la réponse à la forte concentration pluviométrique en fin de saison est encore mal reproduite par le modèle, elle est fortement surestimée (Kouassi A. M., 2007). L'étude des paramètres

du modèle GR2M (valeurs de $X1$ et $X2$ souvent faibles) montre que les différents sous-bassins étudiés ont des réservoirs « sols » qui n'ont pas de très grandes capacités de réserves, ce qui témoigne de la faiblesse de recharge et de soutien des réserves souterraines des différents sous-bassins.

De façon générale, le pas de temps mensuel est une échelle pertinente pour la simulation des écoulements du bassin de la Falémé dans un contexte de variabilité et de changements climatiques.

Conclusion partielle

Suivant le cadre méthodologique établi avec le modèle GR2M, dont l'objectif est de le juger en termes de performance, robustesse et incertitudes associées aux débits simulés, la dynamique des écoulements est bien reproduite. Les performances obtenues en calage varient entre 72,3 % et 94,6 % avec une moyenne de 83,2 %, alors qu'en validation, elles fluctuent entre 64 % et 73,5 % avec une moyenne de 69,1 %. Les résultats de performances obtenus sur le bassin de la Falémé sont dans l'ensemble satisfaisants. Ils ne s'écartent pas de ceux d'Ardoin (2004) dont les performances étaient de 78,4 % à Gourbassi et 82,3 % à Kidira en calage et 81,0 % à Kidira) et 83,0 % à Gourbassi en validation. D'autres auteurs ont également appliqué ce modèle au fleuve Sénégal : Emma Haziza (2003), Sambou *et al*, 2011 dans le Bafing-Makana, Bodian A. (2012) dans le haut bassin du fleuve Sénégal ...

Les débits simulés en calage comme en validation sont très proches des débits observés : en calage, le débit moyen mensuel simulé est de 6,47 mm contre 7,33 mm pour le débit observé ; en validation, le débit moyen mensuel simulé est de 9,77 mm et le débit observé de 11,1 mm. Quelque soit la station considérée, les performances obtenues en calage comme en validation sur la période sèche (1981-1994), sont plus élevées que celles obtenues sur la période humide (1995-2008). Ainsi, la modélisation a fait apparaître des modifications, liées aux facteurs de l'écoulement, intervenues durant les années 1970. Les performances obtenues en calage comme en validation, sont plus élevées à Gourbassi, suivi de Kidira et après Fadougou. Ces faibles valeurs du Nash à Kidira et Fadougou (comparée à Gourbassi) s'expliquent respectivement par le remous entraîné par la confluence de la Falémé avec le fleuve Sénégal et la faible couverture en stations pluviométriques.

Suivant l'objectif d'utiliser un modèle pour caractériser la variabilité hydroclimatique et ses conséquences sur les ressources en eau, l'analyse des incertitudes provenant de la simulation est essentielle. Les incertitudes moyennes, de 1,67 en calage et 1,75 en validation, sont dans une marge acceptable (elles ne s'éloignent pas de la valeur de référence qui est de 1). Les lames d'eau moyennes calculées reproduisent correctement les variations saisonnières observées avec un écart moyen de 0,58 mm en calage et 1,36 mm en validation. La chute des performances, en passant de la phase de calage à la phase de validation, varie entre 19,2 % (à Kidira) et 1,5 % (à Gourbassi) pour une moyenne de 6,09 %. Les écarts constatés pour le critère de $Nash\sqrt{Q}$, sont réduits (14,1 %). Le modèle présente donc des

résultats acceptables en termes de débits simulés, de performance, de robustesse et d'incertitudes associées aux résultats simulés.

L'exploitation des données du modèle dans le bassin de la Falémé a permis de dégager quelques grandes tendances de comportements hydrologiques : des déficits d'écoulement relativement élevés en saison non pluvieuse ; une reconstitution des réserves en eau produite de juin à juillet ; un coefficient d'écoulement important durant la saison pluvieuse (surtout en août et septembre) ; une diminution de l'écoulement sur le cours d'eau à partir du mois d'octobre ; un rôle non négligeable de l'évaporation dans les écoulements du bassin.

Un certain nombre d'inconvénients ressortent, tout de même, de l'approche pluie-débit avec GR2M. Il s'agit, selon Perrin (2000), de : la dépendance amont/aval de l'écoulement ; la difficulté de prise en compte de la zone intermédiaire ; le délai de prévision limité ; l'absence de possibilité de prise en compte des pluies futures. Ces inconvénients sont d'abord caractérisés par une surestimation ($Q_{\text{observé}} / Q_{\text{simulé}} < 1$) ou une sous-estimation ($Q_{\text{observé}} / Q_{\text{simulé}} > 1$). En effet, on constate que les débits de pointes sont fortement sous estimés alors que les débits d'étiage sont fortement surestimés. En plus, la majorité des rapports $Q_{\text{observé}} / Q_{\text{simulé}}$ est comprise entre 0 et 1, ce qui indique qu'il y a plus de débits surestimés (51,1 % des cas à Fadougou, 70 % à Gourbassi et 70,5 % à Kidira en calage) que de débits sous estimés. Toutefois, ces inconvénients ne sont pas de nature à remettre en cause les différents résultats obtenus au cours des différentes simulations.

Comme perspectives de la modélisation de la relation pluie-débit dans un contexte de variabilité et de changements climatiques dans le bassin de la Falémé, on peut noter : l'amélioration des modèles conceptuels à de petites échelles de temps (journalier, horaire...) par intégration d'autres paramètres physiques pertinents ; l'utilisation des modèles semi-distribués et distribués pour mieux apprécier l'impact de la variabilité hydroclimatique sur les ressources.

L'utilisation du GR2M pour modéliser l'écoulement moyen (indispensable à la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau au Sénégal) dans le bassin de la Falémé a prouvé l'efficacité du modèle à mettre en évidence les tendances hydrologiques. Les variations hydroclimatiques inter-temporelles qui donnent lieu à une alternance de périodes d'inondation (crue) et de sécheresse (étiage) dans le bassin, continueront de provoquer des incertitudes auxquelles l'on devrait faire face par une bonne évaluation, une gestion et une planification stratégiques de ses ressources en eau.

PARTIE 4 :

L'ESPACE ET LA SOCIETE : GESTION DES EAUX DU BASSIN DE LA FALEME

La quatrième et dernière partie de la thèse est subdivisée en trois chapitres. :

CHAPITRE X : LE MILIEU ET LES HOMMES

CHAPITRE XI : LES RESSOURCES ET L'ECONOMIE RURALE

CHAPITRE XII : LA GESTION ET L'AMENAGEMENT INTEGRES DES RESSOURCES EN EAU

Aujourd'hui plus que par le passé, la question de l'eau se pose avec acuité en Afrique de l'Ouest. Cette inquiétude est due à la fois, à la succession des années de sécheresse depuis 1970 et aux comportements non maîtrisés des usagers. Afin de réfléchir à une gestion durable des ressources en eau et d'assurer un cadre de vie de qualité, le Sénégal a fourni depuis les années soixante dix d'importants efforts de mobilisation de son potentiel hydraulique, surtout avec la mise en place de l'OMVS, pour faire face aux changements climatiques et socio-économiques. Cependant, cette mobilisation insuffisante face à une demande croissante et à une offre très limitée dans certaines localités, nécessite une vision large de la gestion de l'eau intégrant tous les acteurs. Cet instrument de planification doit refléter l'état actuel du bassin versant en prenant en considération les usages et usagers de l'eau ainsi que les problématiques d'ordre hydrique qui préoccupent les acteurs de l'eau et les populations dans le but de déterminer les solutions envisageables et d'entreprendre les correctifs nécessaires à la préservation de la ressource et des écosystèmes aquatiques.

L'étude du milieu et des hommes concerne l'analyse des données biophysiques et socioéconomiques collectées dans différents services et sur le terrain à partir d'enquêtes, d'entretiens et d'observations dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé. Cette zone dont l'occupation s'est faite par vagues paléo-migratoires successives, connaît une population en pleine croissance.

X.1 La partie sénégalaise du bassin de la Falémé

La partie sénégalaise du bassin de la Falémé couvre une superficie de 11 500 km², soit 39,7% de la superficie totale du bassin, pour deux régions administratives : Tambacounda et Kédougou qui couvrent respectivement une superficie de 42 706 km² et 16 896 km² (soit 30 % du territoire national). Elle est localisée entre 12°20' et 14°27' de latitude Nord et 11°20' et 12°15' de longitude Ouest. La partie sénégalaise du bassin versant de la Falémé est limitée au Nord et au Nord-est par la Mauritanie, au Sud par la Guinée Conakry, à l'Est par le Mali et à l'Ouest par les communautés rurales sénégalaises de Dougué, Bani israel, Tomboronkoto et Dimboli.

Dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé, deux sites d'enquête ont été choisis : la "zone de Kidira" au Nord et la "zone de Saraya" au Sud (Carte 23), un choix qui tient compte de la situation géographique, de la proximité du cours d'eau et de l'accessibilité des villages. Dans chaque zone, 147 ménages ont été interrogés soit un total de 294. L'échantillon de la population interrogée est composite et hétérogène, à l'image du bassin, avec d'abord des Malinkés (61,2% des personnes interrogées), suivi des Pulaar avec 26,2% et des Soninkés en troisième position avec 9,5%.

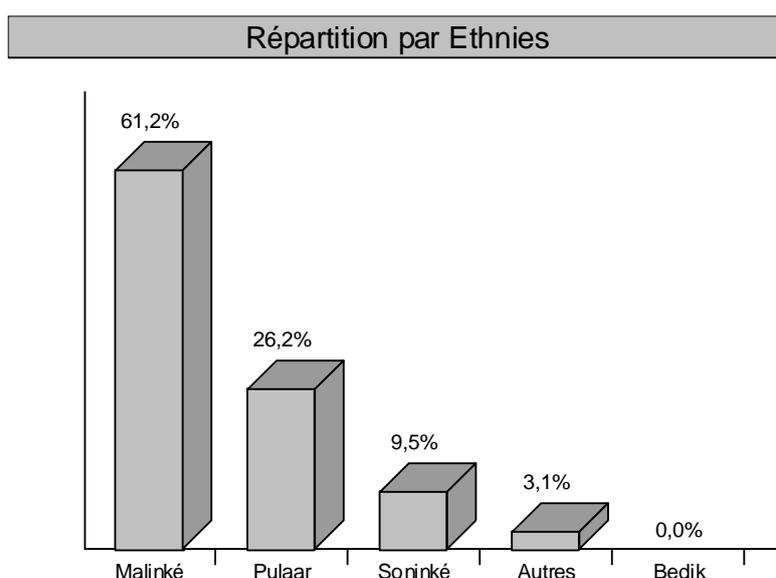
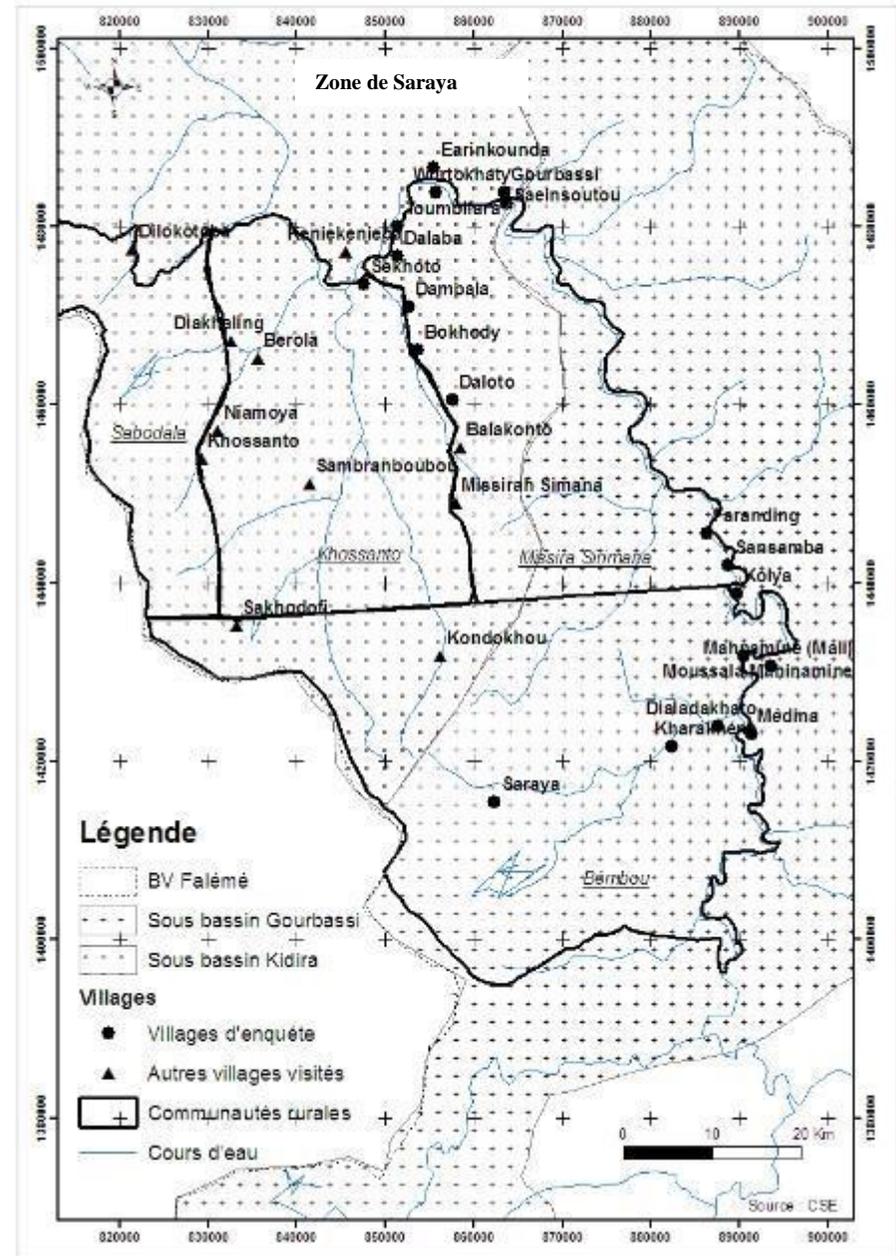
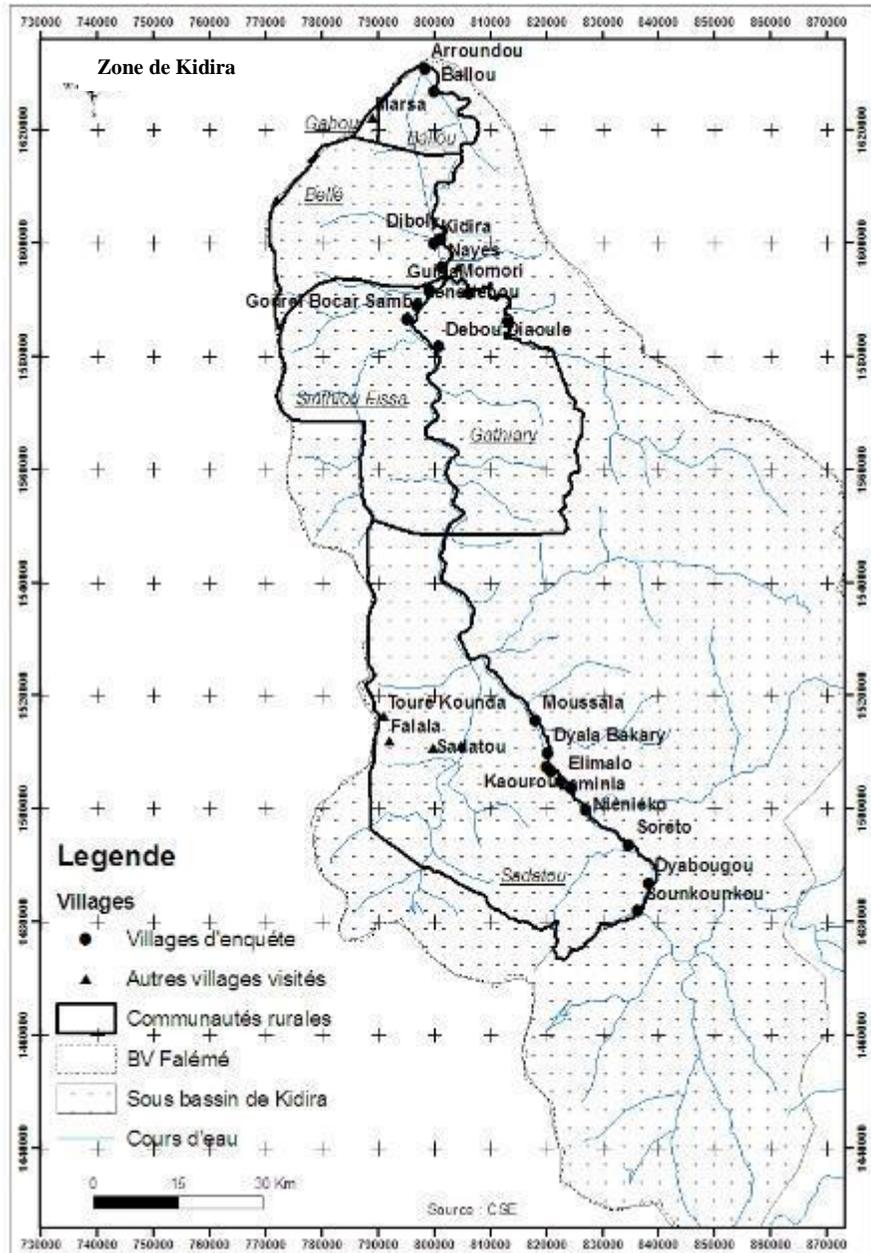


Figure 62 : Appartenance ethnique des personnes interrogées (Source: Résultats d'enquêtes)



Carte 23 : Villages d'enquêtes dans les zones de Kidira et de Saraya

X.2 Les caractéristiques d'une population en pleine croissance

La partie sénégalaise du bassin de la Falémé (Carte 24) bénéficie d'une population multiethnique liée à l'histoire du son peuplement. Elle connaît également un dynamisme démographique qui s'est traduit par une population jeune et mobile.

▪ Un peuplement par vagues paléo-migratoires successives

L'histoire du peuplement de la partie sénégalaise du bassin de la Falémé se réfère à deux principaux groupes : les Peuls et les Malinkés. Elle est fortement liée aux vagues paléo-migratoires qui se sont succédé dans la sous région à la suite du déclin de l'empire du Ghana et du Mali. Baldé M. S., *in* ANSD (2005)⁶⁸, parle de l'installation des Malinkés venus au Nord et à l'Est au XIII^{ème} siècle sur les terres fertiles de la région aurifère de Kédougou, à la suite des Koniaguis, des Dialonkés et des Soninkés. Après le déclin de l'empire du Mali, les guerres d'islamisation et de conquêtes du pouvoir ou d'expansion territoriale ont poussé les populations à se réfugier dans de vastes zones inhabitées.

Au XIX^{ème} siècle, la région connaît encore des guerres internes entre royaumes et des invasions liées à l'islamisation des populations locales. L'installation de populations de confession musulmane, notamment les Peul, venus du Fouta Djallon, a véritablement commencé après ces guerres. C'est à cette époque que le village de Kédougou (actuelle capitale régionale) fut fondé sous l'autorisation des maîtres Malinkés (Dugutigi⁶⁹) par des commerçants venus de Bakel et plus particulièrement de Gadiaga. Ce mouvement migratoire va se poursuivre pendant toute la première moitié du XX^{ème} siècle avec une prédominance de l'émigration en provenance du Fouta Djallon vers le Niokolo, une zone faiblement contrôlée par l'administration française de l'époque.

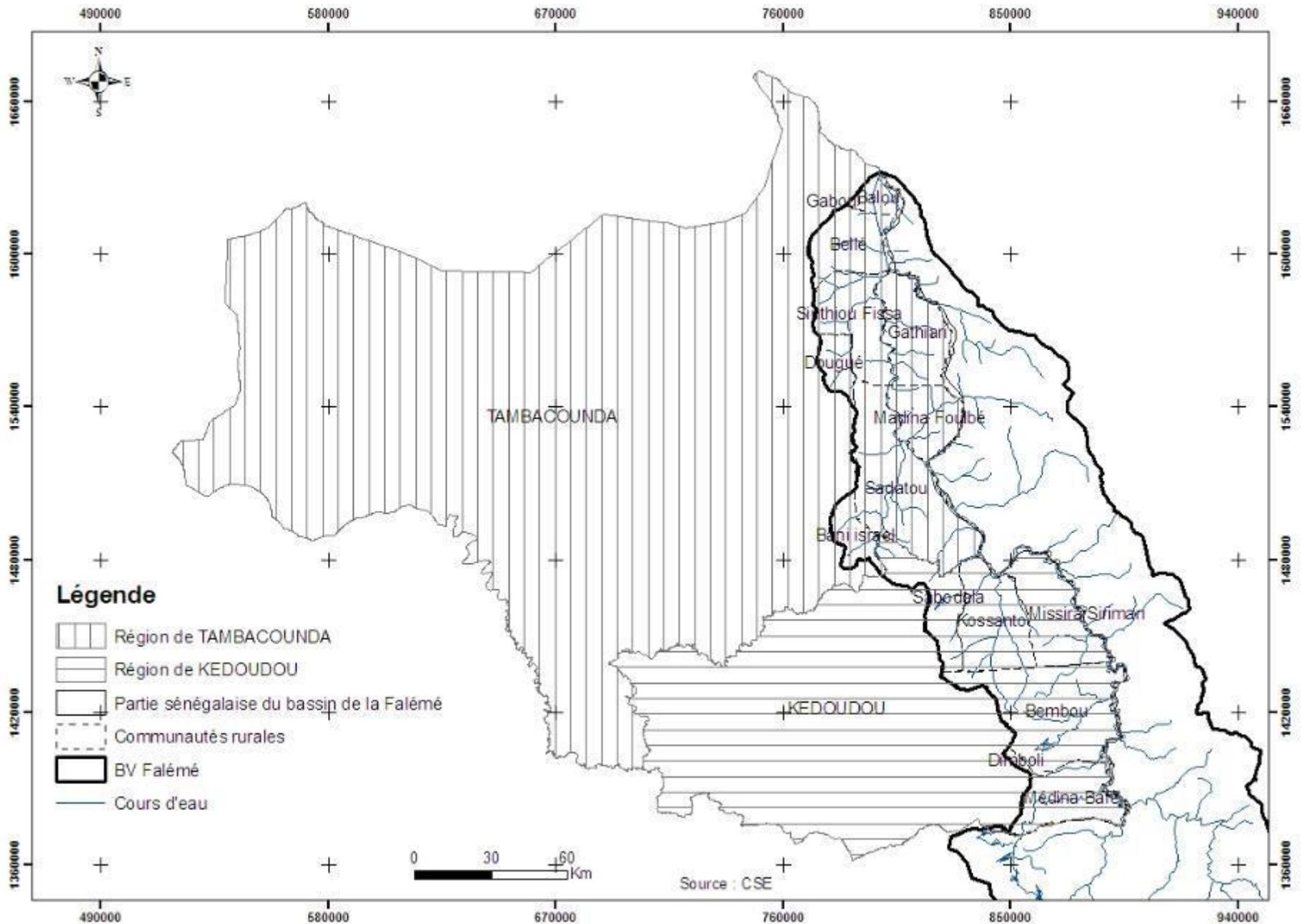
Cette migration en provenance du Sud est à l'origine de la forte présence des Peuls du Fouta Djallon dans de nombreux villages du bassin comme le village de Sansamba dans la Communauté rurale de Missira Sirimana. Le bassin continue d'être une zone d'accueil de migrants qui viennent non seulement des autres régions du pays, mais également des pays de la sous région. De ce fait, des communautés mixtes, composées d'immigrés et d'autochtones, constituent la population du bassin.

▪ Une population hétérogène, jeune et dynamique

En 1961, la population de la région de Tambacounda était estimée à 162.713 habitants. En 1988 avec 493 999 habitants, elle a plus que doublé en 27 ans. De 287 313 habitants en 1976 avec une densité de 4,82 habitants/km², la population de la région atteint 385.982 habitants avec une densité de 6,5 habitants/km² en 1988. En 2005, la population de la région de Tambacounda, avant le nouveau découpage administratif, est estimée à 669 091 habitants avec une densité de 11 habitants/km².

⁶⁸ Agence Nationale de la Statistique et de la Prévention (ANSD), 2005 : Situation économique régionale de Tambacounda édition 2005 ; Service régional de la statistique et de la démographie de Tambacounda., p 53.

⁶⁹ Dugutigi signifie chef de village en malinké



Carte 24 : Régions et Communautés rurales de la partie sénégalaise du bassin versant de la Falémé

Les Départements de Kédougou et Bakel, traversés par le bassin, ont respectivement 17% et 32% de la population régionale. Le taux d'accroissement annuel de la population est variable par localités (**Tableau 92**) avec une moyenne évaluée à 3,1 % entre 1988 et 2002.

Tableau 92 : Evolution de la population totale entre 1988, 2002 et 2005 (ANSD, 2006)

Entités administratives	Population en 1988	Population estimée en 2002	Population estimée en 2005	Evolution entre 1988 et 2002 en %	Evolution entre 1988 et 2005 en %	Evolution entre 2002 et 2005 en %
Arrondissements Fongolimbi	12216	18016	18813	47,5	54,0	4,4
Arrondissements Saraya	16445	24098	25163	46,5	53,0	4,4
Arrondissements Kéniéba	9103	16327	17376	79,4	90,9	6,4
Arrondissements Moudéry	35510	52003	55346	46,4	55,9	6,4
Arrondissements Goudiry	19617	35253	37520	79,7	91,3	6,4
Région Tambacounda	493999	605695	669091	22,6	35,4	10,5
Département de Bakel	143763	192522	215680	33,9	50,0	12,0
Département de Kédougou	75090	102814	111207	36,9	48,1	8,2
Département de Tambacounda	275146	310359	342204	12,8	24,4	10,3

Evolution de la population en pourcentage (ou taux d'évolution) entre l'année 1988 et l'année 2002 = population de l'année 1988 - population de l'année 2002 / population de l'année 1988 X 100

La population régionale est caractérisée par une inégale répartition. Le département de Kédougou a connu en 2005 une densité de 7 habitants/km² contre 10 habitants/km² dans le département de Bakel. Le bassin affiche donc de très faibles densités qui s'expliquent en partie par la présence de nombreuses forêts classées et zones amodiées comme la Zone d'Intérêt Cynégétique de la Falémé, et l'existence de zones inhabitables. La population des régions de Tambacounda et Kédougou (après le dernier découpage administratif) traversées par le bassin, est estimée en 2008 (par l'ANSD) respectivement à 613 066 et 122 333 habitants. Elle est passée de 162 713 habitants en 1961 à 287 313 habitants en 1976 pour atteindre 385 982 habitants en 1988. Entre 1961 et 2008, cette population a été multipliée par 4,5 et durant la période 1976-1988, le taux d'accroissement annuel se situait autour 2,5 en moyenne, soit un niveau de croissance relativement élevé. Aujourd'hui, il est estimé par le RGPH III à 3,6% dans la zone nord du bassin (département de Bakel).

En 2008, les communautés rurales de Ballou, Bellé et Gabou avec respectivement 22 444, 20 924 et 16 861 habitants, sont les plus peuplées de la partie sénégalaise du bassin, suivies de celles de Sadatou et Khossanto avec respectivement 11 210 et 9 194 habitants. En revanche, des communautés rurales de la poche de la Falémé comme Médina Foulbé (2 090 habitants) et Gathiary (2 372 habitants) sont de véritables déserts humains (**Tableau 93**).

Tableau 93 : Taille de la population masculine et féminine dans le bassin de la Falémé (ANSD, 2008)

Descripteurs	Hommes	Femmes	Total estimé en 2008
REGION DE TAMBACOUNDA			
Région de Tambacounda	306375	306691	613066
Zone urbaine	64731	62947	127678
Zone rurale	241644	243744	485388
Département de Bakel	67539	69456	136995
Commune de Kidira	2630	2609	5239
Arrondissement de Kéniéba	9135	10053	19188
CR de Tomboura	1614	1903	3517
CR de Gathiary	1139	1233	2372
CR de Médina Foulbé	991	1099	2090
CR de Sadatou	5391	5815	11210
Arrondissement de Bellé	14167	14422	28589
CR de Bellé	10475	10449	20924
CR de Sinthiou Fissa	3692	3972	7664
Arrondissement de Moudéry	29727	31127	60854
CR de Balou	10974	11470	22444
CR de Gabou	8436	8425	16861
Département de Goudiry	43645	45563	89208
Arrondissement Boyngel Bamba	14571	15957	30528
CR Dougue	2829	2919	5748
Arrondissement de Dianke Makha	4606	5227	9833
CR de Bani Israel	837	1017	1854
REGION DE KEDOUGOU			
Région de Kédougou	59589	62744	122333
Zone urbaine	10281	9773	20054
Zone rurale	49308	52971	102279
Département de Saraya	17584	18335	35919
Commune de Saraya	695	637	1328
Arrondissement de Bembou	5997	6397	12394
CR de Bembou	3283	3447	6730
CR de Médina Baffé	2715	2949	5664
Arrondissement de Sabodala	10892	11305	22197
CR de Sabodala	2961	3031	5992
CR de Khossanto	4523	4671	9194
CR de Missira Sirimana	3407	3603	7010
Département de Kédougou	32790	34297	67087
Arrondissement de Fongolimbi	4606	5227	9833
CR de Fongolimbi	2259	2573	4832
CR de Dimboli	2347	2654	5001

Dans les deux régions, les départements de Tambacounda (41% de la population régionale) et Kédougou (55%) enregistrent une forte concentration de la population. Mais les départements traversés par la Falémé (Goudiry : 14,5% et Bakel : 22,3 % de la population régionale de Tambacounda ; Saraya : 16 % et Salémata : 29 % de la population régionale de Kédougou) sont faiblement peuplés, ce qui se traduit par de grands écarts de densités allant de 0,4 à 58 habitants au km².

En 2008, la population rurale représentait 485 388 habitants à Tambacounda (soit 79% de la population totale régionale) et 102 278 habitants à Kédougou, soit 84%. Dans la partie sénégalaise du bassin, la population vit presque totalement en milieu rural, excepté celle des rares communes comme

Kidira, Saraya, Goudiry. Cette population est aussi inégalement répartie dans l'espace et elle est essentiellement rurale.

Le bassin est marqué par une véritable mosaïque ethnique constituée de plusieurs groupes ou sous-groupes d'importance très inégale en nombre. Ainsi trois grands groupes sociaux se distinguent : le groupe Pulaar est le plus important (48,1% dans la région de Tambacounda et 41,1% dans la région de Kédougou), suivi des groupes Malinké et Soninké, fortement représentés dans les départements de Bakel et de Saraya, qui constituent respectivement 17% et 16,9% de la population régionale de Tambacounda, 34,2% et 1,8% de la population régionale de Kédougou. Au-delà, les autres groupes sont numériquement minoritaires surtout à Tambacounda : Bassaris, Koniaguis, Tendas, Djallonkés... Ces groupes, pourtant originaires de la localité, représentent 20,4% de la population régionale de Kédougou, ce qui est tout de même relativement important (**Tableau 94**).

Tableau 94 : Répartition de la population des deux régions par groupe ethnique (RGPH.II)

Groupes ethniques	Région de Tambacounda	Région de Kédougou
Pulaar	48,1%	41%
Malinké	12%	34,2%
Bambara	3,65%	0,8%
Soninké	16,9%	1,8%
Wolof	9,10%	1,4%
Sérère	2,95%	0,4%
Autres	7,20%	20,4%

La répartition de la population en 1988, par groupes d'âges et par sexe, fait apparaître la prédominance de la tranche d'âge de 0-19 ans, ce qui caractérise l'extrême jeunesse de la population (**Tableau 95**). En effet, les jeunes de moins de 20 ans représentent 58 % de la population totale. Par rapport à 1976, la prédominance des jeunes s'est renforcée, en 1988, de plus de 6 %.

Tableau 95 : Structure de la population par grands groupes d'âges et par sexe de la région de Tambacounda

Groupe d'âges	1976							1988						
	Total		Masculin		Féminin		RM	Total		Masculin		Féminin		RM
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%		Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	
0-19	149 05	52	75307	52	73748	51,3	102	225872	58	111345	59	114527	58	97
20-59	123663	43	59934	42	63729	44,4	94	145530	38	69725	37	75805	39	92
60 et +	14 595	5	8270	6	6325	4,4	131	14580	4	8073	4	6507	3	124
TOTAL	287313	100	143511	100	143802	100	100	385982	100	189143	100	196839	100	96

Source RGPH /1976 – 1988 RM = Rapport de Masculinité

En considérant le sexe, on constate que dans la tranche d'âge de 60 ans et plus, les hommes sont plus nombreux que les femmes en 1976 et en 1988. De même, dans la tranche d'âge des moins de 20 ans, les hommes sont numériquement plus importants que les femmes (**Tableau 95**).

La population des régions de Tambacounda et de Kédougou est à 96 % musulmane, les catholiques et autres représentent respectivement 3 % et 1 %. Les principales confréries représentées dans ces régions

sont les Tidianes, les Khadres et les Mourides avec des proportions respectives de 56 %, 26 % et 8 % (Conseil Régional de Tambacounda, 2001⁷⁰). Cette répartition est sensiblement la même au niveau du bassin.

Le rythme élevé de la croissance de la population résulte de l'effet combiné d'une fécondité élevée, d'une mortalité en baisse (Tableau 96) et d'une immigration qui prend de plus en plus d'ampleur.

Tableau 96 : Taux de mortalité

Mortalités	Région de Tambacounda
	Taux pour 1000
Mortalité néonatale	43
Mortalité postnatale	54
Mortalité infantile (1q0)	96
Mortalité juvénile (4q1)	66
Mortalité infantilo juvénile (5q0)	156

*Source : Tableaux de synthèse (Sénégal) - EDS II - niveaux actuels de la mortalité.
1q0 = 0 à 1 an ; 4q1 = 0 à 4 ans ; 5q0 = 0 à 5 ans*

Selon les enquêtes réalisées dans le cadre de l'Enquête Démographique et de Santé (EDS II), le bassin serait caractérisé par un taux de natalité très élevé et de mortalité en baisse grâce, entre autres, à l'amélioration des conditions sanitaires. Malgré la baisse, les niveaux actuels de la mortalité, selon EDS II/Sénégal, restent toujours élevés (néonatale : 43‰ ; postnatale : 54‰ ; infantile : 96‰ ; juvénile : 66‰ ; infantilo juvénile : 156‰).

Le bassin est aussi le théâtre d'importants mouvements migratoires internes comme externes. Ces migrations s'expliquent, entre autres, par sa position géographique (frontières avec le Mali et la Guinée Conakry), son appartenance à un espace ethnolinguistique sous-régional et ses énormes potentialités économiques. Les mouvements migratoires qui ont la plupart un caractère saisonnier y sont liés aux activités d'orpaillage et au nomadisme pastoral. Le bassin reçoit d'importants flux migratoires en provenance des pays voisins comme la Guinée Conakry et le Mali (5% de la population régionale de Tambacounda y provenaient en 1988). Il enregistre aussi, dans sa partie Nord, d'importants départs vers les pays européens et certains pays africains. L'importance de l'émigration, selon les personnes interrogées, est principalement liée à son apport économique (matériel et financier) permettant l'amélioration des conditions de vie. Ainsi les revenus tirés permettent souvent le comblement du déficit vivrier, la constitution de dot de mariage, l'achat d'ordonnances médicales, l'achat de bétail pour un frère ou un cousin resté au village... Une bonne partie de la population du bassin provient des autres régions du Sénégal (selon l'ANSD, 8% de la population des régions de Tambacounda et Kédougou). A l'intérieur du bassin, la population, essentiellement rurale, est aussi très mobile.

⁷⁰ Conseil Régional, 2001 : Plan régional de développement intégré de Tambacounda 2001-2006, Tome 1 : bilan diagnostic, janvier 2001 139 p.

Dans le bassin, l'habitat est de type groupé (soit 98,3% des personnes interrogées), une caractéristique d'un système traditionnel de culture permanente et d'une organisation sociale plus intégrée. La segmentation des lignées a donné naissance à des sous-groupes, pratiquant une multitude d'activités, base d'une économie locale plus ou moins dynamique. Ces activités, essentiellement tournées vers le secteur agricole, bénéficient très rarement d'un encadrement par des structures de tutelles, malgré la présence de quelques ONG tels que "La Lumière" s'activant dans la conservation de la biodiversité. Seulement, les ressources en eau et en terres s'amenuisent de plus en plus et répondent difficilement aux exigences de production d'une population croissante, ce qui représente une menace pour les sociétés rurales vulnérables du bassin. Avec une distribution très clairsemée (181 villages sur 11500 km²), la répartition des villages fait apparaître une dualité : la zone du « *walo* » (qui longe la Falémé et concentre la plupart des villages) et la zone du « *diéri* » (avec des villages éparpillés sur de vastes surfaces), une occupation qui répond généralement à une logique d'une économie rurale agropastorale de subsistance plus ou moins dynamique.

Conclusion partielle

La croissance démographique est intimement liée à la pression sur les ressources en eau, surtout avec l'augmentation des besoins (conséquents et indispensables) en eau. Dans le bassin de la Falémé, avec une explosion démographique qui s'accélère, la population est jeune et essentiellement rurale. Cette population nombreuse a des aspirations multiples. Ces dernières tiennent à l'amélioration du cadre de vie avec des besoins collectifs exprimés très variés : mise en place de point de santé (35,7% des personnes interrogées), aménagement de points d'eau potable (22,4%), appui en matériels et intrants (19,9%), aménagement de routes (12,2%), électrification rurale (7,1%), éducation (3,4%). Les autres problèmes soulignés sont le chômage des jeunes et particulièrement leur non emploi dans les sociétés d'exploitation minières du bassin, le mauvais état des routes et des pistes qui traversent le bassin, le manque de moyens de transport, la destruction des cultures par les animaux sauvages ... Cette population jeune, dynamique et inégalement répartie occupe souvent des zones où le poids démographique est très faible par rapport à l'étendue des superficies, l'habitat dispersé et les densités faibles. Des villages sont également confrontés à des problèmes de pauvreté pour 33,3% des personnes interrogées, d'analphabétisme (33,2%) et d'enclavement (32,9%). S'y ajoute la dégradation continue des ressources naturelles disponibles dans le bassin. Pour satisfaire les besoins d'une population sans cesse croissante, de multiples stratégies (comme la multiplication des activités agricoles et d'exploitation minière) sont développées dans les villages. Toutefois, la satisfaction des besoins est limitée par la faible mobilisation des ressources en eau, dans un contexte de variabilité et de changements climatiques. De ce fait, l'économie rurale, fortement dépendante des ressources en eau, reste durablement affectée.

L'analyse des données biophysiques et socioéconomiques collectées sur le terrain permet de présenter les ressources en eau et les activités de production qui en dépendent dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé. Il s'agit pour les ressources en eau des eaux de pluies, de surface et eaux souterraines.

XI.1 Une pluviométrie déficitaire

Selon les personnes interrogées (Tableau 97), la pluie a connu une diminution des totaux (75,9% de l'échantillon) associée à une réduction du nombre de jours de pluies (55,4%) liée à des débuts tardifs de la saison pluvieuse (92,5%).

Ces constats ont poussé 51% des personnes interrogées à abandonner leurs champs pour se reconverter à d'autres activités, notamment l'exploitation de l'or.

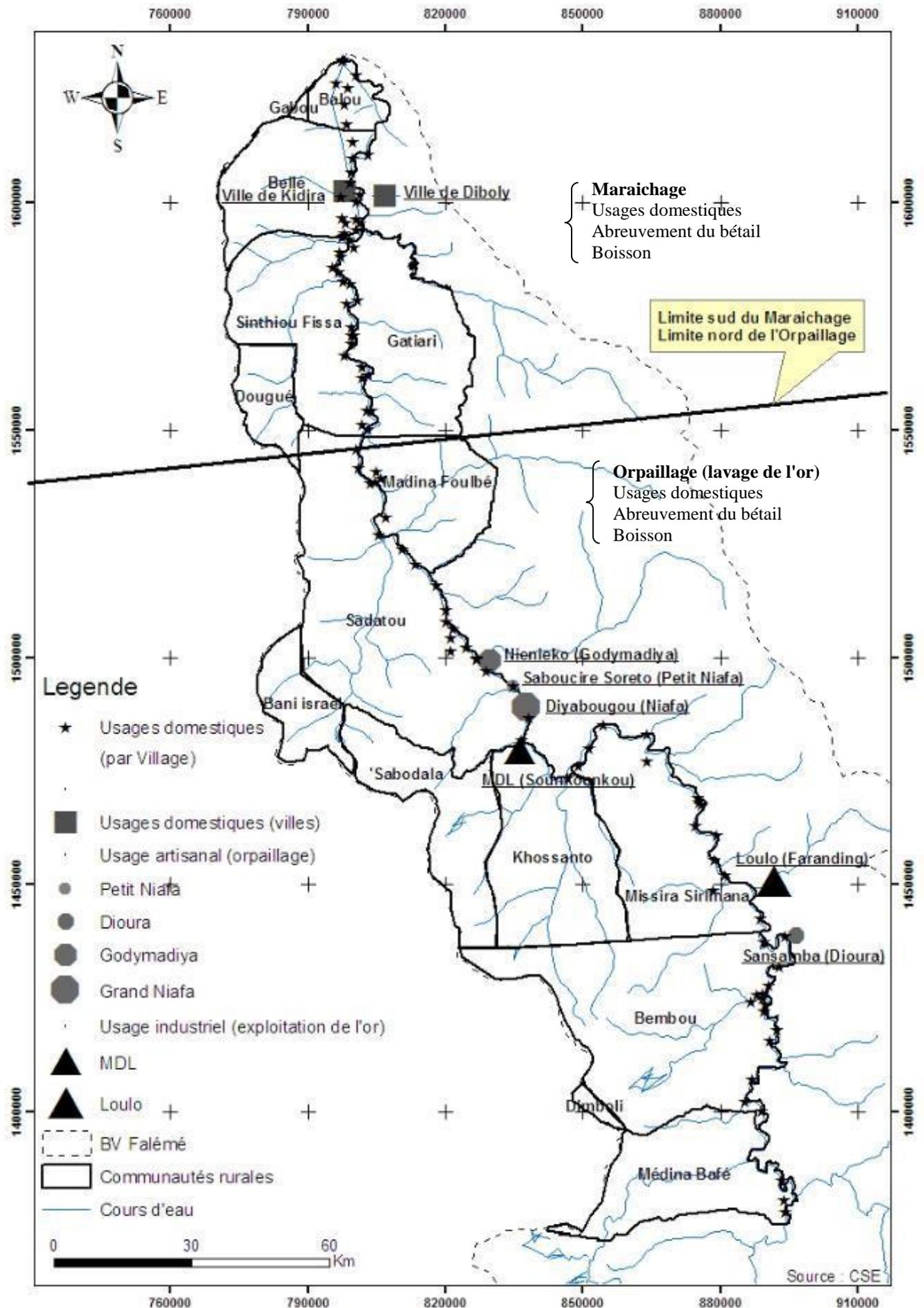
En revanche, 62,9% se sont réadaptés à la situation alors que 55,4% ont introduit de nouvelles spéculations (plus adaptées au contexte déficitaire) et seulement 18,7% ont adopté l'irrigation pour obtenir de l'eau en appoint.

Tableau 97 : Quelques caractéristiques des eaux de pluie dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)

Constatez-vous la diminution des pluies ?	Nb. cit.	Fréq.	Est-ce qu'il y a des champs abandonnés ?	Nb. cit.	Fréq.
Non réponse	7	2,4%	Non réponse	92	31,3%
Oui	223	75,9%	Oui	150	51,0%
Non	64	21,8%	Non	52	17,7%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	100%
Constatez-vous la diminution du nombre de jours de pluies ?	Nb. cit.	Fréq.	Est-ce qu'il y a de nouvelles spéculations liées aux pluies ?	Nb. cit.	Fréq.
Non réponse	70	23,8%	Non réponse	113	38,4%
Oui	163	55,4%	Oui	144	49,0%
Non	61	20,7%	Non	37	12,6%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	100%
Quel constat faites-vous du début de la saison des pluies ?	Nb. cit.	Fréq.	Quelles stratégies adoptez-vous face à la diminution des pluies ?	Nb. cit.	Fréq.
Non réponse	13	4,4%	Non réponse	54	18,4%
Tardif	272	92,5%	Réadaptation	185	62,9%
Précoce	2	0,7%	Nouvelle culture	163	55,4%
Normal	7	2,4%	Irrigation	55	18,7%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	

XI.2 Des eaux de surface, support de nombreux usages

La Falémé est le cours d'eau principal et son écoulement est pérenne à certains endroits. Des rivières et des écoulements temporaires sont reliés au cours d'eau. Il existe aussi des mares et des marigots localisés dans les dépressions (type ravins). On distingue deux types d'usagers pour les eaux de surface : les grands et les petits usages.



Carte 25 : Caractérisation des usages de l'eau de la Falémé dans la partie sénégalaise du bassin

Parmi les grands usagers des eaux de surface, on trouve :

- **L'usage semi industriel** concerne l'exploitation de l'or. Deux grandes compagnies d'exploitation font des prélèvements significatifs : SMC à Sabodala (Sénégal) et Rand Gold à Loulo (Mali) dans la Falémé. L'exploitation semi-industrielle de l'or est ainsi une grande consommatrice d'eau.
- **L'usage artisanal** concerne les prélèvements pour la pratique de l'orpaillage sur des sites spécifiques appelés placers et pouvant contenir des milliers d'orpailleurs. Dans le bassin, on peut distinguer, par ordre d'importance, les placers du Niafa à Dyabougou, de Godimadya à Niéniéko, de Dioura à Faranding et du petit Niafa à Soréto, chacun contenant des milliers d'orpailleurs.
- **L'usage domestique** concerne les prélèvements sur les ressources, surtout dans les villes de Kidira et Diboli traversées par la Falémé. La taille relativement importante de leur population (52 339 habitants à Kidira en 2008) et leurs multiples usages domestiques expliquent les importantes prises d'eau sur de la Falémé.

Les autres usages ou "petits usages", à l'échelle du village, concernent l'alimentation en eau, les usages domestiques, l'abreuvement du bétail, l'irrigation et le lavage de l'or (**Tableau 98**). Les trois premiers usages sont partagés et présents presque dans tous les villages près du cours d'eau. Quant aux deux derniers usages, l'irrigation et le lavage de l'or, ils permettent de subdiviser le bassin en deux : une zone Sud et une zone Nord (**Carte 25** et **Tableau 99**).

Tableau 98 : Usages de l'eau de surface dans le bassin versant de la Falémé (Source: Résultats d'enquêtes)

Les usages des eaux de surface	Nb. cit.	Fréq.
Abreuvement du bétail	280	95,2%
Usages domestiques	279	94,9%
Maraichage	260	88,4%
Boisson	192	65,3%
TOTAL OBS.	294	100%

La zone Sud est caractérisée spécifiquement par l'activité de l'orpaillage (activité dominante chez les Malinkés) avec l'utilisation de l'eau pour le lavage de l'or. Elle se limite dans la poche de la Falémé, à la CR de Médina Foulbé. La deuxième zone, juste après la première, est localisée au Nord et se particularise par les activités du maraîchage et de la culture irriguée (activités bien présentes dans les villages où vivent des Soninkés). Dans cette zone, les berges sont aménagées en champs et l'eau de la Falémé utilisée pour leur irrigation. Les différents usages de l'eau de la Falémé sont le maraichage (88,4% de l'échantillon), l'abreuvement du bétail (95,2%), les usages domestiques (94,9%), la boisson (65,3%).

Tableau 99: Usages de l'eau de la Falémé dans des villages explorés (Source: Résultats d'enquêtes)

Zone Nord	Présence de Forage	Les usages de l'eau de la Falémé par villages				
		Alimentation en eau	Usages domestiques	Bétail	Irrigation	Lavage de l'or
Sanankolé	×	×	×	×	×	-
Sénédebou	×	×	×	×	×	-
Naye	×	×	×	×	×	-
Gourel Bocar samba	×	×	×	×	×	-
Guita	×	×	×	×	×	-
Arroundou	×	×	×	×	×	-
Marsa	×	×	×	×	×	-
Zone Sud	Forage	Alimentation en eau	Usages domestiques	Bétail	Irrigation	Lavage de l'or
Kolya	-	×	×	×	×	×
Saeinsoutou	×	×	×	×	×	×
Wortokhaty	-	×	×	×	×	×
Toumbirara	-	×	×	×	×	×
Dyabougou	×	×	×	×	×	×
Dalaba	-	×	×	×	×	×
Sékhoto	×	×	×	×	×	×
Dambala	×	×	×	×	×	×
Bokhody	×	×	×	×	×	×
Daloto	×	×	×	×	×	×
Soukounkou	×	×	×	×	×	×
Soréto	×	×	×	×	×	×
Laminia	×	×	×	×	×	×
Sékhoto	×	×	×	×	×	×
Elimalo	×	×	×	×	×	×
Dyala Bakary	×	×	×	×	×	×
Moussala	×	×	×	×	×	×
Kaourou	×	×	×	×	×	×
Niéniéko	×	×	×	×	×	×
Kolya	×	×	×	×	×	×
Faranding	-	×	×	×	×	×
Madina	-	×	×	×	×	×
Moussala Sadatou	×	×	×	×	×	×
Sansamba	-	×	×	×	×	×

LEGENDE

Elément présent	×
Elément absent	-

Dans certains villages, l'eau de la Falémé, souvent très polluée, est utilisée comme boisson : les usages domestiques (**Photo 1**) et le puisage d'eau de boisson sont souvent malheureusement faits sur les mêmes endroits du cours d'eau, ce qui entraîne des risques de pollution de l'eau.



Photo 1 : Usages domestiques de l'eau de la Falémé (cliché de Faye C, avril et décembre 2010)

L'érection de barrages, avec l'exploitation de l'or, entraîne souvent des risques pour les populations qui boivent l'eau de la Falémé sans traitement. C'est le cas des populations du village de Faranding et du barrage de Rand Gold à Loulo, construit à 7 km de leur village. Ce dernier, disent-elles, a rendu l'eau du cours d'eau tellement polluée que sur une période de quatre mois, 15 habitants dudit village, atteints de maux de ventre ou diarrhées, sont décédés. Le chef du village affirme : « *Aucun habitant du village ne travaille dans la mine, alors que nous sommes les premiers à subir les méfaits ; chaque année, entre le mois de mars et juillet, l'eau de la Falémé est de très mauvaise "qualité" et de mauvais "goût", alors que nous continuons de la consommer, le village n'ayant pas de forage pour son adduction en eau potable* ». Les contraintes majeures, au-delà des problèmes de pollution des eaux, sont le tarissement précoce des mares et marigots et de certains tronçons de la Falémé.

XI.3 Des eaux souterraines fortement sollicitées

L'exploitation des eaux souterraines est faite avec des forages et des puits ou des « céanes ». Un nombre important de villages sont dotés d'infrastructures hydrauliques et le nombre de forages comme de puits par village varie de 0 à 6 (Tableau 100).

Tableau 100 : Puits et forages forés dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)

Nombre de puits	Nb. cit.	Fréq.	Nombre de forages	Nb. cit.	Fréq.	Profondeur de la nappe	Nb. cit.	Fréq.
Pas de puits	71	33,0%	Pas de forage	41	16,0%	Moins de 8 m	10	6,6%
De 1 à 2	71	33,0%	De 1 à 2	137	53,5%	De 1 à 2 m	16	10,5%
De 2 à 3	22	10,2%	De 2 à 3	62	24,2%	De 2 à 3 m	9	5,9%
De 3 à 4	1	0,5%	De 3 à 4	14	5,5%	De 3 à 4 m	41	27,0%
De 4 à 5	21	9,8%	De 4 à 5	0	0,0%	De 4 à 5 m	25	16,4%
De 5 à 6	19	8,8%	De 5 à 6	1	0,4%	De 5 à 6 m	3	2,0%
Plus de 6	10	4,7%	Plus de 6	1	0,4%	Plus de 6 m	48	31,6%
TOTAL CIT.	215	100%	TOTAL CIT.	256	100%	TOTAL CIT.	152	100%

Dans la zone de Saraya, les puits ont une profondeur variant entre 8 à 30 m, alors que pour les forages, la profondeur peut aller jusqu'à 40 m. La qualité des eaux de la nappe est bonne à acceptable pour les populations locales interrogées (79,2% de l'échantillon). Cependant, 63,9% constatent une diminution des eaux de la nappe et 61,9% celle de la quantité d'eau. Pour faire face aux problèmes de manque d'eau, certaines populations font recours au recréusement de puits (22,8%), (Tableau 101).

Tableau 101 : Autres caractéristiques des eaux souterraines (Source: Résultats d'enquêtes)

Comment est la qualité de l'eau ?	Nb. cit.	Fréq.	Avez-vous constaté une diminution des eaux de la nappe ?	Nb. cit.	Fréq.
Bonne	203	69,0%	Non réponse	77	26,2%
Acceptable	30	10,2%	Oui	188	63,9%
Moindre	6	2,0%	Non	29	9,9%
Mauvaise	1	0,3%			
TOTAL OBS.	294		TOTAL OBS.	294	100%
Constatez-vous la diminution des quantités tirées de la nappe ?	Nb. cit.	Fréq.	Est-ce qu'il vous arrive de recréuser les puits ?	Nb. cit.	Fréq.
Non réponse	90	30,6%	Non réponse	110	34,0%
Oui	182	61,9%	Oui	67	22,8%
Non	22	7,5%	Non	127	43,2%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	100%

En plus de la consommation comme eau de boisson, l'eau de la nappe est aussi utilisée, surtout dans les villages éloignés du cours principal de la Falémé, pour les usages domestiques (61,3%), l'abreuvement du bétail avec le creusement de puits et de céanes (17,1%), le maraîchage (11,2%), (Figure 63). Cette exploitation des eaux de la nappe rencontre plusieurs contraintes avec la présence du socle dont les aquifères sont souvent improductifs dans une bonne partie du bassin, mais également avec la dispersion des villages dans un bassin très vaste.

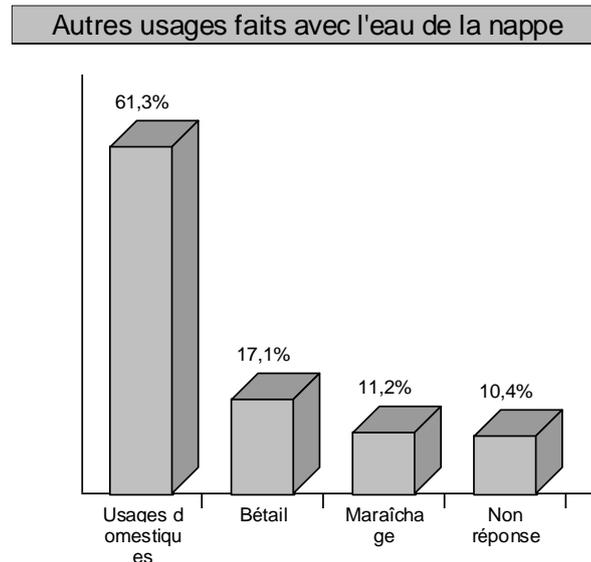


Figure 63: Différents usages des eaux de la nappe dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)

L'alimentation en eau potable est l'une des principales préoccupations des populations sénégalaises du bassin de la Falémé. Une bonne partie de la population consomme l'eau puisée du cours d'eau, sans traitement préalable, car au même endroit, se font le linge, la vaisselle, l'abreuvement du bétail et le puisage pour l'eau de consommation.



Photo 2 : Adduction d'eau potable (AEP) dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)

Les équipements hydrauliques se résument principalement aux forages à pompe manuelle et puits traditionnels (Photo 2 et Tableau 102). Les principaux atouts du secteur de l'hydraulique se résument à la disponibilité annuelle en eau et à l'existence d'un important réseau hydrographique, la priorité étant accordée à l'alimentation en eau potable des populations par les pouvoirs publics. Les populations de plusieurs villages, situés le long de la Falémé, sont privées de tout équipement hydraulique moderne

ou fonctionnel et utilisent l'eau du cours d'eau pour la boisson, malgré les risques énormes de maladies.

Tableau 102 : Equipements hydrauliques des communautés rurales dans le département de Saraya

Rubrique	Khossanto	Bembou (ex Saraya)	Missira Sirimana	Médina Baffé	Total
Forages non équipés	10	11	8	9	38
Puits	12	15	12	6	35
Eoliennes	5	10	5	-	20
Forages motorisés	-	2	-	-	2
Bornes fontaines	-	2	-	-	2

Source : Service Régional d'Appui au Développement Local (SRADL), 2006

Les contraintes liées à l'accès à l'eau s'expliquent d'abord par l'insuffisance des équipements hydrauliques, mais également par l'absence de systèmes d'exhaure adéquats, faisant de l'accessibilité à l'eau potable la plus grande difficulté pour de nombreux villages. S'y ajoutent le tarissement des puits et leur éboulement, l'assèchement des mares et rivières durant la saison sèche (OXFAM/IFAN, 2008)⁷¹. Parallèlement, la nappe phréatique est instable (difficilement chargée du fait de l'imperméabilité des roches sur les plateaux cuirassés difficilement accessibles) et tarit vite. Elle se trouve dans des poches dont les capacités ne peuvent alimenter les populations que sur une période très limitée (4 à 5 mois après l'hivernage). Ces contraintes sont renforcées par la vétusté des équipements et les pannes fréquentes des forages.

Les situations des 36 villages de l'étude, en rapport avec l'adduction en eau potable, sont mitigées (**Tableau 99**) : certains villages s'approvisionnent à partir de petits systèmes d'adduction en eau potable, de quelques puits et sources aménagés (Sénédebou, Naye, Gourel Bocar Samba, Moussala, Ballou, Arroundou, Saeinsoutou...). D'autres villages qui n'en disposent pas utilisent des puits traditionnels qui tarissent souvent entre mars et mai, mais également des sources d'eau naturelles comme les ruisseaux et rivières du bassin (Wortokhaty, Toumbifara, Faranding, Médina, Sansamba, Kolya...). La surcharge de travail des femmes est exacerbée par la corvée d'eau et celles-ci mettent beaucoup de temps et d'énergie pour assurer l'approvisionnement correct des foyers en eau potable, à partir des points d'eau naturels comme la Falémé, pendant la saison non pluvieuse. Les systèmes d'adduction en eau sont confrontés à des pannes récurrentes. Les habitants des zones les plus reculées du bassin doivent parcourir de longues distances (à pied ou à dos d'animaux) pour s'approvisionner en eau à partir de la Falémé.

XI.4 L'eau et les activités de production

Pour les activités de production, les diverses sources d'eau utilisées sont la Falémé et ses nombreux affluents, les barrages hydro-agricoles, les marigots permanents ou saisonniers, les mares saisonnières et des retenues d'eau temporaires, les forages, l'eau des bas-fonds. Les activités de production présentes dépendent de la diversité des ressources en eau du bassin de la Falémé. Le **Tableau 103**

⁷¹ OXFAM/IFAN, 2008 : Rapport de recherche sur les industries extractives au Sénégal (Kédougou), août 2008, 99 p.

présente les relations entre les différents types de ressources en eau et les usages sectoriels à l'échelle du bassin. Il montre l'importance des eaux de surface fortement sollicitées dans la satisfaction des besoins des usagers, dans un contexte où la priorité pour les usages non agricoles (exploitation de l'or) reste très marquée.

Tableau 103 : Relations entre types de ressources en eau et usages sectoriels de l'eau (Source: Résultats d'enquêtes)

Types d'eau	Usages
<p>Eaux de surface</p> <p>La Falémé et ses nombreux affluents ; Les barrages hydro-agricoles ; Les marigots permanents ou saisonniers ; Les mares saisonnières ; Les retenues d'eau temporaires ; Les bas-fonds.</p>	<p>Agriculture de décrue Maraîchage (irrigation) Arboriculture (irrigation) Abreuvement du bétail Orpaillage Exploitation industrielle de l'or Pêche artisanale Alimentation en eau potable Usages domestiques Transport de passagers par pirogue</p>
<p>Eaux de pluie</p>	<p>Agriculture sous-pluie Alimentation en eau potable Usages domestiques</p>
<p>Eaux souterraines</p> <p>Les forages motorisés et non équipés (pompes manuelles) ; Les bornes fontaines ; Les éoliennes ; Les puits traditionnels.</p>	<p>Maraîchage Abreuvement du bétail Orpaillage Exploitation industrielle de l'or Alimentation en eau potable Usages domestiques</p>

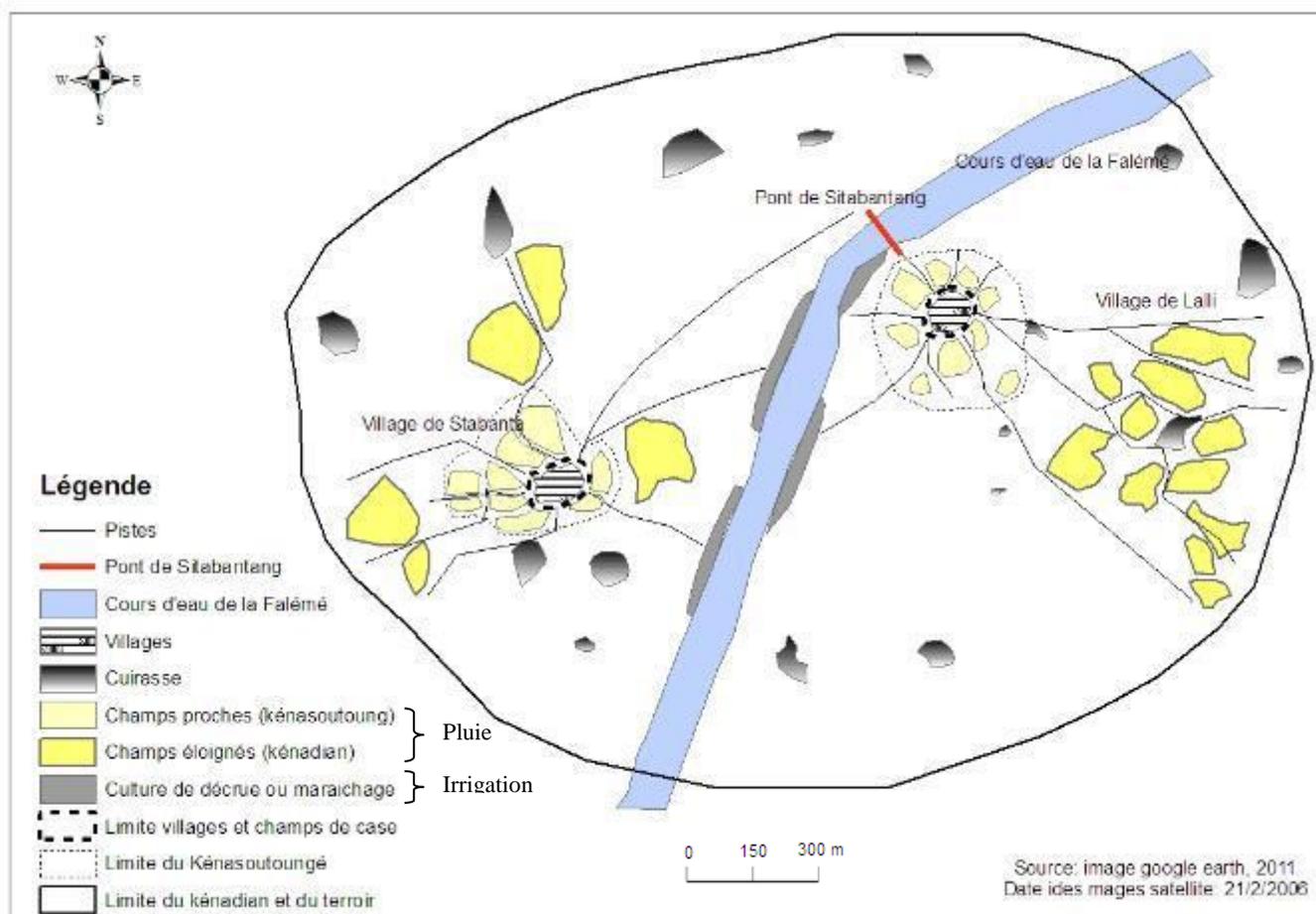
XI.4.1 Une agriculture traditionnelle en dépit d'énormes potentialités

Dans le bassin, les possibilités de développement de l'agriculture reposent, au-delà de l'importante des terres arables, sur la disponibilité des ressources en eau de surface, l'existence de terres irrigables, l'adaptation des variétés au milieu et une pluviométrie favorable comprise entre les isohyètes 500 et 1500 mm. L'agriculture est la principale activité qui emploie la presque totalité de la population dans le bassin. Différents systèmes de production agricole sont pratiqués dans le bassin. L'agriculture sous-pluie qui est la plus pratiquée (98,3%) est associée à l'agriculture de décrue et au maraîchage pour des spéculations nombreuses et variées.

Les terroirs de culture sont presque identiques dans tous les villages du bassin, ce qui relève de l'homogénéité de l'espace concerné et de l'environnement similaire du milieu. L'organisation en auréoles concentriques, évoquée par Péliissier P. (1973)⁷² dans son ouvrage intitulé « *les paysans du Sénégal* », s'y retrouve. L'espace agricole est généralement structuré en champs de case ("kénasoutoung") et en champs de brousse ("kénadian") pour les cultures sous-pluie. A ceux-là s'ajoutent également des champs accotés au cours d'eau, pour les cultures irriguées (Carte 26). Le bassin de la Falémé est caractérisé par une économie agropastorale de subsistance avec des sites de villages généralement choisis en fonction de la disponibilité annuelle en eau. Ainsi la plupart des

⁷² Péliissier P., 1973 : les paysans du Sénégal, *Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance*, Saint- Yrieix. Imprimerie Fabrègue, 939 p.

villages sont implantés le long du cours d'eau, surtout à côté des tronçons où l'écoulement est souvent pérenne.



Carte 26 : Espace agricole et types d'eau utilisée à Lalli (CR de Gathiary) et Sitabanta (CR de Sinthiou Fissa)

1. L'agriculture sous-pluie

Dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé, les spéculations sont nombreuses, variées et strictement dépendantes de la pluviométrie (Tableau 104). Il s'agit du maïs (99,7% de l'échantillon), aliment à la base de l'alimentation locale, de l'arachide (98,3%), du mil (95,9%), du coton (39,8%)... L'activité occupe la population active durant 5 mois. Malgré le potentiel important d'actifs engagés, cette agriculture continue d'être une agriculture de subsistance et seul un faible surplus est commercialisé. Parfois, elle arrive difficilement à couvrir les besoins en nourriture des populations locales, entraînant un déficit vivrier endémique. Les fluctuations des superficies emblavées par ménage dépendent de la main d'œuvre disponible. Les rendements varient le plus souvent avec la quantité de pluie reçue dans le bassin. Ainsi, avec le retour d'une pluviométrie abondante ces dernières années, les rendements des cultures sous-pluie ont connu une légère hausse. Toutefois, les avis, par rapport à ces rendements, sont mitigés : 64,3% de l'échantillon pensent qu'ils augmentent contre 26,9%, alors que 8,8% parlent de stabilité.

Tableau 104: Caractéristiques de l'agriculture pluviale (Source: Résultats d'enquêtes)

Spécifications de l'agriculture sous-pluie	Nb. cit.	Fréq.	Comment se comportent les rendements ?	Nb. cit.	Fréq.
Maïs	293	99,7%	Augmentation	189	64,3%
Arachide	289	98,3%	Diminution	79	26,9%
Mil	282	95,9%	Stabilité	25	8,8%
Coton	117	39,8%	Non réponse	0	0,0%
Autres	242	82,3%			
TOTAL OBS.	294		TOTAL OBS.	294	100%

2. L'agriculture de décrue

L'agriculture de décrue se fait sur les bords de la Falémé et de ses affluents et se pratique en période d'étiage, de mai à octobre, lorsque les eaux du cours d'eau se retirent. Au niveau de la Falémé et plus précisément dans les bassins de décantation de la plaine alluviale, les parcelles sont perpendiculaires aux axes de drainage (**Photo 3**). On peut y distinguer : un liseré de petits champs situés le long du cours d'eau, des blocs de lanières accolées aux boucles de méandres qui sont généralement les lieux d'implantation des villages.



Photo 3 : Agriculture dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009)

Les principales spéculations sont le maïs et les cultures maraîchères telles que la patate, le piment, les aubergines, les tomates, le gombo, le niébé, les oignons... Dans certains villages, l'agriculture de décrue se confond avec le maraîchage alors que dans d'autres, une nette séparation est notée. Le maïs cultivé sur les berges de la rivière a des rendements pouvant atteindre 1,1 tonnes par hectare. Dans certains villages, l'agriculture de décrue, bien que présente, est moins développée, ce qui s'explique par le choix des espaces accotées au cours d'eau pour la pratique de l'orpaillage alluvionnaire. Contrairement à l'agriculture sous-pluie qui dispose souvent de vastes espaces, les cultures de décrue souffrent d'un manque de terres avec des champs dont la taille varie entre 600 et 2000 m². L'exploitation est souvent sous la tutelle des premiers occupants dans chaque village (les premiers venus sont les mieux et souvent les seuls servis). La fonction attribuée à cette agriculture de décrue est

de permettre l'amélioration de la situation alimentaire du village, en vertu des possibilités d'emblavement offertes. Cette agriculture est extensive et dépend essentiellement d'un matériel rudimentaire. L'activité souffre de la destruction ou la consommation des récoltes par la faune sauvage (singes, phacochères, oiseaux, hippopotames...).

3. Le maraîchage

Le maraîchage, une autre activité directement liée à la Falémé, se pratique sur les berges du cours d'eau (comme l'agriculture de décrue) par les femmes quand il reste des disponibilités en espaces (**Tableau 105**). Les principales cultures légumières sont la patate douce (69,7% de l'échantillon), la tomate (59,2%), le piment (54,4%) les pastèques (24,8%)... Les hommes font des aménagements sur les flancs des berges présentant un paysage de cultures étagées. Les villages sénégalais concernés sont Sanankolé, Gourel Bocar Samba, Guita... dans la zone de Kidira ; Faranding, Saënsoutou, Wortokhaty ... dans la zone de Saraya et maliens sont Diboli, Goubassi, Farinkounda... Le maraîchage procure un surplus de production souvent écoulé ou échangé avec des céréales dans le bassin. La patate est la spéculant qui donne les rendements les plus élevées (entre 8 à 9 tonnes à l'hectare).

Tableau 105: Principales spéculations du terroir (maraîchage) (Source: Résultats d'enquêtes)

Spéculations du maraichage	Nb. cit.	Fréq.
Patate	205	69,7%
Tomate	174	59,2%
Piment	160	52,4%
Pastèque	73	24,8%
Pomme de terre	10	3,4%
Autres	154	52,4%
Non réponse	75	25,5%
TOTAL OBS.	294	

Pour l'arrosage des plantes, les motopompes sont rares : les femmes utilisent des seaux, les hommes des arrosoirs manuels vétustes ou des seaux. Seuls les villages de Guita et Gourel Bocar Samba disposent de motopompes destinées à une agriculture intensive. L'utilisation de l'engrais et des produits phytosanitaires pour augmenter les rendements est absent. Le maraîchage des femmes est surtout destiné à l'autoconsommation pour les légumes. Pour les hommes, la production est écoulé dans les marchés ou "loumas"⁷³ souvent très éloignés et dont l'accès est difficile. Tout comme l'agriculture de décrue, le maraîchage souffre de manque d'espace et de main d'œuvre. Ainsi, il ne constitue pas une source d'emplois permanente et productive, en mesure de donner une valeur ajoutée, pour les populations. Elles s'adonnent à d'autres activités comme l'élevage, la pêche, l'orpaillage... L'arboriculture, peu développée, n'a donc pas connu le même essor que l'agriculture sous-pluie et le maraîchage. De tous les villages interrogés, une seule plantation, bénéficiant d'un système d'irrigation

⁷³ Le « louma » est un marché hebdomadaire qui est la principale occasion pour les villageois de trouver une gamme variée de produits de première nécessité de la ville et d'écouler leurs produits agricoles.

moderne à partir de la Falémé, a été recensé, il s'agit de bananiers à Guita. Les manguiers sont aussi présents dans la brousse de Saraya, un peu loin de la Falémé, arrosés avec de l'eau de puits.

Du fait de l'enclavement, de la pauvreté et de l'absence de structure d'encadrement, la quasi-totalité des exploitants agricoles ne disposent pas de matériels modernes, ni d'engrais, ni de produits phytosanitaires ou zoosanitaires. Le matériel est constitué d'outils aratoires comme la charrue (37.1%), la houe (27.2%), la machette (21,4%), la hache (12.9%) pour une agriculture vivrière dans des conditions difficiles. Les faibles moyens de production dont disposent les exploitants dans le bassin et les conditions écologiques du milieu les contraignent à pratiquer une agriculture de subsistance, peu consommatrice d'eau. La taille des parcelles est réduite avec 69,4% des ménages interrogés qui exploitent moins de 5 ha, alors que seulement 4,8% exploitent plus de 10 ha. Dans le "diéri" du bassin, les spéculations sont strictement dépendantes de la pluviométrie, alors que dans le "walo", il y a un système d'irrigation.

Dans le bassin, 46,8% des personnes interrogées ont des activités agricoles sur toute l'année contre 62,1% seulement durant la saison pluvieuse (Tableau 106). Il s'agit surtout des populations éloignées du cours d'eau ou ne disposant pas de champs accotés au cours d'eau. Le système de culture est généralement de type extensif (96,9%) contre seulement 5,5% qui utilisent souvent un système intensif avec l'usage de motopompes ou de tracteurs affrétés par la SODEFITEX pour l'exploitation du coton. La jachère est pratiquée à hauteur de 78,2% et l'usage de l'engrais animal à hauteur de 77,6%.

Tableau 106 : Système de culture (Source: Résultats d'enquêtes)

Les périodes au cours desquelles se développent les activités ?	Nb. cit.	Fréq.	Quel système de culture pratiquez-vous ?	Nb. cit.	Fréq.
Non réponse	26	8,8%	Non réponse	9	3,1%
Saison pluvieuse	267	90,8%	Système extensif	285	96,9%
Saison non pluvieuse	135	46,6%	Système intensif	17	5,8%
TOTAL OBS.	294		TOTAL OBS.	294	
Pratiquez-vous la jachère ?	Nb. cit.	Fréq.	Amendez-vous les champs ?	Nb. cit.	Fréq.
Non réponse	6	2,0%	Non réponse	57	19,4%
Oui	230	78,2%	Oui	228	77,6%
Non	58	19,7%	Non	9	3,1%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	100%

Les principaux obstacles au développement agricole se résument à l'enclavement du bassin, la faiblesse de l'accès au crédit, les conditions climatiques, la baisse de la fertilité des sols, le faible niveau d'équipement agricole, l'état obsolète du matériel agricole, le coût élevé des intrants agricoles...

XI.4.2 Un élevage traditionnel dans une zone à potentialités importantes

Le bassin de la Falémé est une importante zone de prédilection de l'élevage et peut jouer un rôle moteur, en vertu des potentialités énormes dont il dispose. Au-delà des ressources fourragères, le

caractère extensif de l'élevage s'explique par la grande disponibilité en eau dans le bassin. L'élevage y est de deux types : sédentaire (locaux) et transhumant (étrangers). Le cheptel est composé généralement d'ovins (32,9 % de l'échantillon), de bovins (31,9 %), de caprins (26,9 %), mais aussi d'équins, d'asins... (7,6 %). On trouve pour les bovins la race « ndama » et la race « djakoré » (issue du croisement entre la « ndama » et le zébu) parfaitement adaptés au milieu. Les petits ruminants sont constitués de la race « djallonké » et de la chèvre guinéenne. Les ânes sont aussi bien représentés dans le bassin, contrairement aux chevaux, en raison de la présence de la mouche tsé-tsé.



Photo 4 : Elevage dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2010)

La possession d'un troupeau est un aspect culturel et est synonyme de respect et de considération. En effet, dans les conceptions populaires et traditionnelles, le bétail est considéré comme un signe de richesse : « *Le cheptel est le capital du rural* ». Seulement, la taille du troupeau par ménage dépasse rarement 50 têtes, soit 76,5% de l'échantillon (**Figure 64**). Le bétail constitue un moyen d'épargne selon les populations interrogées : « *Puisqu'il n'y a pas de banques ici et puisqu'on ne peut pas se déplacer à tout moment pour rejoindre les centres villes, il nous est plus facile de vendre le bétail pour résoudre nos problèmes* ». L'élevage est fondé principalement sur la recherche du plus important effectif avec souvent des troupeaux sous exploités. Dans le bassin, la valeur économique du cheptel est reléguée au second plan au profit de son pouvoir social. L'élevage des ruminants semble être uniquement destiné aux échanges et rares sont les populations qui s'adonnent à des abattages d'animaux sains si ce n'est lors des cérémonies (fêtes, sacrifices, mariages, rites d'initiation et funérailles).

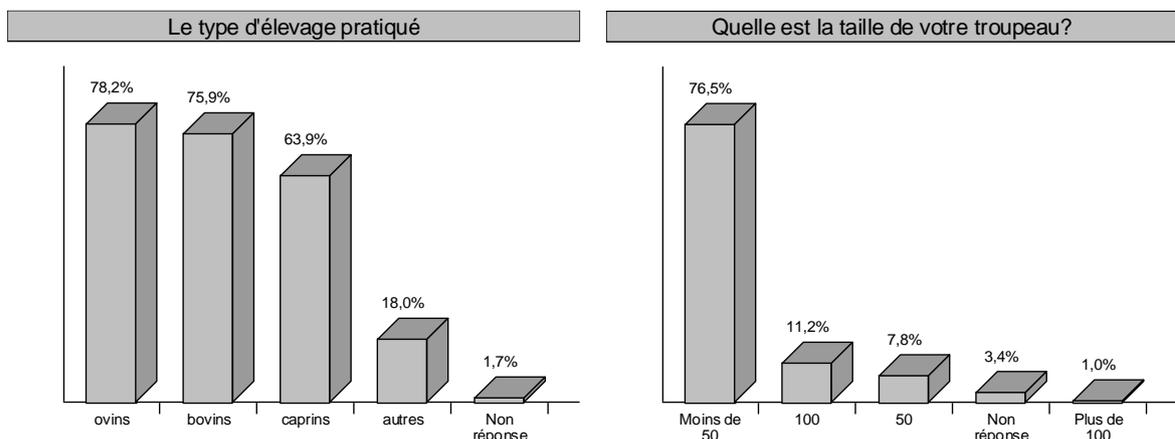


Figure 64 : Types d'élevage utilisés et taille du troupeau (Source: Résultats d'enquêtes)

La productivité des pâturages est importante dans le temps et dans l'espace, avec la quantité de la pluviométrie et la fertilité des sols. A côté du cheptel villageois, il y a de grands troupeaux de transhumants à la recherche de pâturages et de points d'eau. Le rôle de la Falémé pour l'abreuvement du bétail est en général périodique. En saison pluvieuse, les multiples mares et marigots temporaires servent à abreuver le bétail alors qu'en saison non pluvieuse, avec le tarissement de ces multiples points d'eau, la Falémé reste le seul recours dans le bassin, excepté les "céanes" et les forages. Ainsi, pour les populations, en saison non pluvieuse, la plupart des bergers avec leurs troupeaux s'établissent à une courte distance du cours principal de la Falémé. De ce fait, 87,8% des personnes interrogées reconnaissent son rôle important, à très important tandis que 90,1% l'indiquent comme lieu d'abreuvement du bétail (Tableau 107). Des espaces spécifiques réservés aux pâturages n'existent pas dans le bassin. En conséquence, la divagation du cheptel qui s'ensuit, entraîne une dégradation des ressources végétales et la destruction des cultures.

Tableau 107: Rôle de la Falémé dans l'abreuvement du bétail (Source: Résultats d'enquêtes)

Comment appréciez-vous le rôle joué par la Falémé ?	Nb. cit.	Fréq.	Quel est le lieu d'abreuvement du bétail ?	Nb. cit.	Fréq.
Très important	221	75,2%	La Falémé	265	90,1%
Important	37	12,6%	Autres rivières	143	48,6%
Moindre	23	7,8%	Non réponse	14	4,8%
Non réponse	13	4,4%			
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	

Les animaux sont en liberté après les périodes de récolte, principalement à partir du mois de janvier. Le 15 janvier, au plus tard, tous les animaux sont en divagation sur tout le terroir, cela jusqu'à l'hivernage suivant. Cette pratique s'observe surtout dans le « *diéri* » du bassin, alors que les agriculteurs qui sont situés dans le « *walo* » profitent de cette saison de liberté pour transhumer vers le « *diéri* ». Un nombre infime d'actifs s'adonne à l'élevage, la priorité étant accordée à l'agriculture sous-pluie destinée à l'autoconsommation. Les éleveurs ne travaillent réellement qu'en saison pluvieuse pour éviter la destruction des champs de culture. Dans la partie sénégalaise du bassin, le sous secteur de l'élevage n'a pas connu le développement à la mesure de ses potentialités (animaux, espaces, savoir-faire ...).

La transhumance dans le bassin de la Falémé a une grande ampleur et revêt deux aspects : celle des Peul venus du Nord-est du Sénégal et celle des Maliens qui traversent la Falémé pour conduire le bétail sur les prairies enherbées de la partie sénégalaise du bassin. La transhumance est malheureusement un facteur de déséquilibre écologique, par la dégradation de l'environnement qu'elle entraîne. Elle s'accompagne de mutilation et d'émondage des arbres, surtout en période de soudure et de feux de brousse, des dégâts sur les cultures et sur les récoltes, du braconnage et des conflits de plus en plus préoccupants entre éleveurs étrangers et populations autochtones.

XI.4.3 La pêche, une activité entièrement dépendante de la Falémé

La pêche, une activité qui doit entièrement sa raison d'être à la Falémé, est pratiquée dans tous les villages riverains. La pêche est exclusivement pratiquée par les hommes et mobilise les jeunes et les adultes, elle est de type artisanal et les captures sont généralement de petites tailles. Comme la Falémé est un cours d'eau partagé, les différents intervenants sont à la fois des Sénégalais (« Somonos ») ou venus au Nord du pays (« Tioubalo ») et des Malinkés du Mali. Ces derniers s'activent beaucoup plus dans la pêche que les « Tioubalo » et « Somonos » (la presque totalité des pêcheurs « Somonos » sont d'origine malienne et certains d'entre eux se sont installés au Sénégal depuis trois à quatre générations).



Photo 5 : Activité de pêche dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)

A partir du rivage ou d'une pirogue (loin du rivage), les pêcheurs utilisent la ligne, la nasse et le filet. Les produits de la pêche sont destinés au marché local constitué d'abord du village lui-même et des alentours. Toutefois, l'écoulement du poisson est confronté au handicap le plus partagé du bassin : l'enclavement, et les prises la plupart du temps sont destinées à l'autoconsommation. Le surplus de la production, non consommée par le pêcheur, est souvent offert à des parents ou voisins proches, faute d'acquéreurs sur le marché. Un pêcheur capture en moyenne entre 8 à 10 kilogrammes par jour, le kilogramme vendu à hauteur de 1000 FCFA. Le kilogramme de capitaines en revanche est vendu au cours d'eau à 1250 FCFA à des repreneurs qui vont l'écouler dans des communes comme Sadiola. La pêche pratiquée par les Maliens dans la poche de la Falémé est souvent une source de contestation, surtout si ces pêcheurs refusent d'écouler leurs débarquements dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé.

Les contraintes majeures liées à la pêche sont le tarissement d'une partie de la Falémé, l'assèchement précoce des rivières et mares secondaires, et l'insuffisance en équipements pour la pratique de l'activité.

XI.4.4 Une exploitation minière à la fois industrielle et artisanale

L'exploitation minière est l'activité la plus grande consommatrice d'eau du bassin qui renferme plusieurs minerais tels que le fer, le gravier, le marbre et surtout l'or. Selon Touré B. (2002)⁷⁴ citant

⁷⁴ Touré B., 2002 Monographie de la Communauté Rurale de Gathiary, Arrondissement de Kéniéba, mémoire de maîtrise de géographie, FLSH, Dakar, 138 p

Vidal P. (1896), « *L'or existe en abondance dans les terrains d'alluvions que traversent les affluents du Sénégal. Et plus on se rapproche de la Falémé et plus l'abondance de la poudre de l'or et la grosseur des pépites augmentent... La nature, la disposition et la situation de ces gisements en rendent l'exploitation très simple et très facile* ». Ce qui explique le choix des sites situés près du cours d'eau pour l'orpaillage au détriment de l'activité agricole (agriculture de décrue et maraichage). L'exploitation de l'or dans le bassin montre une dualité : là où le minerai est riche, des industriels l'exploitent (Sabodala au Sénégal et Loulo au Mali) ; là où il ne l'est pas, c'est l'exploitation artisanale. Le **Tableau 108** donne les entreprises minières présentes dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé.

Tableau 108: Sociétés et titres miniers dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé (Service Régional des Mines, 2005)⁷⁵

Types	Sociétés et zones autorisées
Exploitation industrielle	Mineral Deposits Limited : MDL (Sabadola)
Exploitation artisanale	TERIYA (Maka Bigui, Sokhodofi) ; GUEYE ET FRERES (Kerekonko) ; LIBIDOR (Bondala, Mouran) ; SODATEC (Douta) ; CCIA (Yilimalo, Moussala) ; D RADES FINANCES (Missira Sirimina).
Recherche	Sociétés étrangères : RAND GOLD (Kanoumering, Kéniéba, Tomboronkoto) de l'Afrique du Sud ; OROMIN (Sabadola) ; AGEM (Bambadji) ; AXMIN (MW Sabadola) du Canada ; EXIMCOR (Khossanto).
	Sociétés nationales : SORED MINES (Khossanto); ROKAMKO (Khossanto) ; WATIC NAFPE ; SENGOLD...

▪ Une exploitation industrielle limitée

L'exploitation semi-industrielle se fait sous forme de « petite mine » selon la terminologie du code minier : il s'agit d'une « *exploitation de gisement de petite taille [...]. Pour les métaux précieux, notamment l'or, est considérée comme petite mine toute exploitation dont la capacité de traitement journalière ne dépasse pas 250 Tonnes de minerai.* ». L'exploitation ne peut dépasser 5 km² en superficie et 15 mètres en profondeur⁷⁶.

L'exploitation purement industrielle de l'or est assurée par de grandes sociétés étrangères. Dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé, la société Mineral Deposits Limited (MDL) à travers sa filiale Sabodala Mining Company (SMC), une société de droit sénégalais, est en charge de l'exploitation des gisements aurifères de Sabodala. Le permis d'exploitation couvre une superficie de 20 km² et les ressources estimées à 68 tonnes pour une production de 150 000 onces d'or (plus de 4 tonnes) par an durant 10 ans. En phase d'exploitation, la SMC a la capacité d'employer 500 personnes et prévoit le traitement d'environ 2 millions de tonnes de minerais par an. Les besoins en eau sont estimés à environ 3,5 millions de m³ par an, répartis entre les activités de l'exploitation, la compensation des pertes liées à l'évaporation des plans d'eau durant le stockage et la gestion des poussières, d'où la mise en place d'une conduite d'eau reliant la Falémé à l'usine. En plus de la SMC, d'autres sociétés étrangères et nationales mènent des activités d'exploration dans le bassin. Ce nombre

⁷⁵ Document fourni par le Service Régional des Mines de Tambacounda.

⁷⁶ République du Sénégal, 2003 : Loi n° 2003-36 du 24 novembre 2003 portant Code Minier.

élevé de sociétés et d'entreprises dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé s'explique en partie par la présence de l'eau, élément indispensable pour le lavage des minerais. Ce qui explique la position des différentes concessions minières par rapport au cours d'eau (Carte 27). Cette exploitation industrielle est à l'origine de la création de grandes mares artificielles de lavage du minerai dont les eaux sont polluées par les énormes quantités de cyanure hautement toxique pour les hommes et le bétail.

▪ **Une exploitation artisanale très dynamique**

L'orpaillage est une activité traditionnelle pratiquée de façon saisonnière depuis fort longtemps par les populations dans le bassin de la Falémé (Direction des mines et de la Géologie, 1999). Il y est très développé et emploie une main d'œuvre abondante et variée, constituée de Sénégalais, de Maliens, de Guinéens... L'orpaillage occuperait aujourd'hui, dans la région de Kédougou, près de 50 000 personnes pour une production annuelle de 500 kg valorisée à 4 000 000 FCFA/kg, devenant ainsi un secteur économique non négligeable qui échappe à tout contrôle officiel (PRDI)⁷⁷. L'orpaillage est à l'origine de l'abandon des champs et de la diminution des terres de culture des paysans.

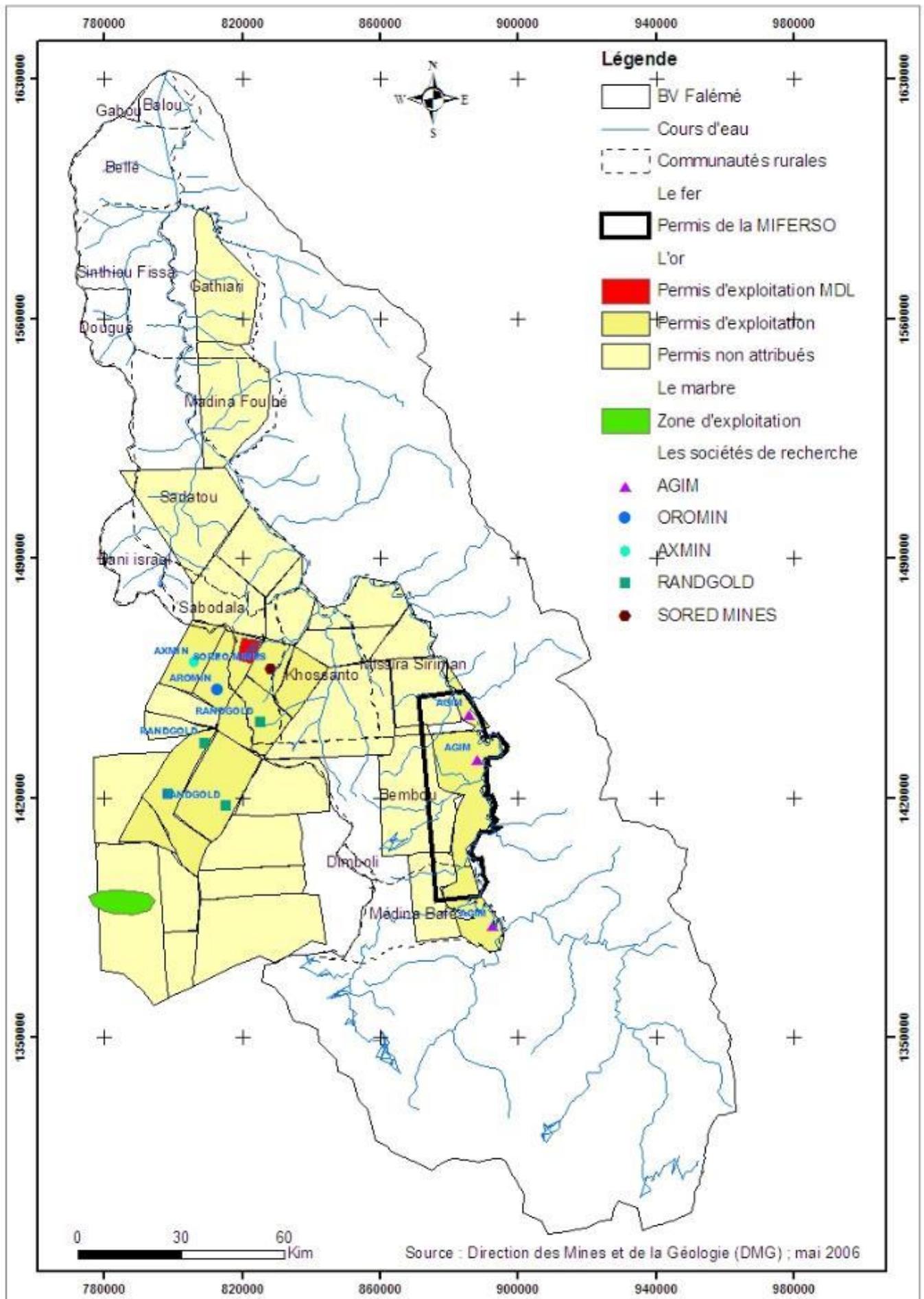
L'orpaillage alluvionnaire se pratique sur les berges de la Falémé. Il s'agit d'une activité discontinue qui n'est pratiquée qu'en période d'étiage, lorsque les eaux de la Falémé se retirent sur une bonne partie de son lit majeur. Dans le bassin, 83,6% des personnes interrogées sur l'orpaillage reconnaissent le rôle très important de la Falémé pour le lavage de l'or contre seulement 0,7% (généralement des orpailleurs qui sont éloignés du cours d'eau comme à Daloto, Bokhody...).



Photo 6 : Orpaillage dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, décembre 2010 et avril 2011)

La Photo 6 montre différentes méthodes de lavage de l'argile aurifère. L'eau utilisée, toujours tirée de la Falémé par des pompes, n'y est pas retournée après lavage. Cependant, l'eau finit malheureusement par retourner au cours d'eau par ruissellement en période de pluie ou par écoulement souterrain. Le cyanure et le mercure, des produits ultra toxiques, sont souvent utilisés pour le lavage de l'or afin de permettre à la roche de libérer le métal. Dans le bassin de la Falémé, le mercure, banalement appelé "le produit", est utilisé par certains orpailleurs (46,9%) malgré le danger potentiel dans la zone de Saraya. Quant au cyanure, il est utilisé dans l'exploitation industrielle de l'or à Sabadola par la SMC.

⁷⁷ Conseil Régional, 2001 : *Plan Régional de Développement Intégré de Tambacounda 2001-2006*, Version provisoire, Tome I et II.



Carte 27 : Potentiel minier et permis d'exploitation dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé

Dans le placer d'or « *Nyafa* », site d'orpillage implanté dans le village de Dyabougou (CR de Sadatou), situé à moins d'un kilomètre du cours d'eau, plus de 200 jeunes s'activent dans le puisage de l'eau à l'aide d'une pompe installée sur le cours d'eau. (Le bidon de 20 litres rempli coûte 10 FCFA au cours d'eau et 100 FCFA au placer). Chaque jour, le propriétaire dit tirer environ 400 m³ et gagner en moyenne 150 000 FCFA. Mis à part la pompe, un important volume d'eau est aussi puisé directement du cours d'eau. Les pertes d'eau sont énormes et les populations, du fait de la disponibilité de l'eau en quantité, se soucient peu de sa gestion.

▪ **De nombreux risques sur l'environnement naturel et économique du bassin**

Les conséquences de l'exploitation minière sur l'environnement naturel et économique représentent une nouvelle menace potentielle. Dans le bassin de la Falémé, les activités d'extraction sont extrêmement destructrices et polluantes. Parmi les impacts sur les ressources en eau, on peut noter avec Tropica Environmental Consultants (2006)⁷⁸ : une pression sur les ressources en eau dans un bassin où, du fait de formations géologiques imperméables, la nappe phréatique est discontinue et temporaire et la nappe profonde "rare", une pollution des eaux usées de la mine, un risque de pollution des eaux de surface... Du point de vue économique, la Zone d'Intérêt Cynégétique (ZIC) de la Falémé semble être la plus touchée. Selon Greig I. (2006)⁷⁹, les activités extractives sont nuisibles à l'attractivité touristique de la région, la ZIC de la Falémé où se trouvent neuf campements de chasse est directement menacée. Les activités minières accentuent la crise traversée par le secteur agricole et surtout la filière cotonnière. Dans les terroirs villageois, les champs de cultures et les sites d'extraction de l'or se côtoient. Par conséquent, lorsque l'or "apparaît" à un endroit, beaucoup de producteurs abandonnent le coton. Plusieurs champs de culture ont été transformés en sites d'extraction minière artisanale, et dans l'espoir d'obtenir un travail salarié, de nombreux paysans ont abandonné le coton avec l'implantation de sociétés minières industrielles. Selon Dia (2006)⁸⁰ : « *L'impact de la mine sur les activités traditionnelles est d'autant plus important que la culture du coton est également menacée par les difficultés de l'ensemble de la filière* ». Devant la faillite de l'agriculture vivrière, l'or reste la seule richesse marchande et l'orpillage la seule activité véritablement génératrice de revenus.

XI.4.5 Les autres activités de production

Dans la zone (en plus de la marche et des différents moyens de locomotion tels que le vélo, les motocyclettes, les charrettes), le transport de passagers est une fonction importante de la Falémé. En hivernage, les villages riverains sont coupés du reste du Sénégal avec la destruction des pistes, le cours

⁷⁸ Tropica Environmental Consultants, 2006 : Etude d'impact environnemental et social du projet d'exploitation d'or, d'argent et de substances connexes de Sabodala, Dakar, 184 p.

⁷⁹ Greig I. 2006 : Le Sénégal oriental à l'aube du développement minier : quels enjeux pour les collectivités locales ? Mémoire de Master Lettres arts sciences humaines et sociales, Ecole Normale Supérieure de Lettres et Sciences Humaines de Lyon (France), 60 p.

⁸⁰ Dia N., 2006. Activités minières et culture cotonnière : l'exemple de la mine d'or de Sabodala au Sud-est du Sénégal, Mémoire de Maîtrise de Géographie, UGB/Saint-Louis, 91 p.

d'eau devient la seule voie de communication ; c'est ainsi que chaque village riverain a ses pirogues pour le transport de personnes en plus de celles qui servent à la pêche.

Le commerce et l'artisanat sont deux activités qui sont peu développées dans le bassin, les lieux d'écoulement étant très faibles. Le commerce est limité dans le bassin et le manque d'infrastructures routières reste le goulot d'étranglement pour les échanges commerciaux. Le commerce n'a pas connu le même essor que les autres activités du fait de l'enclavement et de l'absence de lieux de commercialisation ou de "louma". L'agriculture y étant principalement vivrière, les rares surplus de la production, s'ils ne sont pas donnés aux voisins qui en disposent moins, sont commercialisés dans des villes dont l'accès est trop difficile, surtout en période pluvieuse. Dans la zone de Saraya, les transactions commerciales portent essentiellement sur le minerai au niveau des placers, chaque placer disposant de lieux de commercialisation et le gramme d'or vendu entre 10 000 et 15 000 FCFA en fonction des villages, des placers et des saisons. Le petit commerce porte sur des denrées alimentaires, des tissus, des outils et autres matériels en provenance des villes les plus proches.

La cueillette occupe une place importante dans le quotidien des populations du bassin, généralement comme activité secondaire. Les produits de cueillette constituent plus de 90% des recettes domaniales (SRADL, 2006), et la forte dépendance des populations vis-à-vis des produits de la nature peut, à terme, mettre en danger certaines espèces animales et végétales. Les produits issus de l'exploitation forestière, destinés en grande partie à une utilisation locale, sont généralement utilisés pour l'habitat, la cuisson (96,6%) et l'artisanat (85,7%). La dégradation de la flore est accentuée par les transhumants pour l'alimentation de leur bétail. Du fait de cette exploitation incontrôlée, abusive, non autorisée et de la forte pression sur les ressources végétales, plusieurs espèces sont menacées de disparition. Pour lutter contre l'utilisation abusive, les populations interrogées préconisent généralement la protection d'espèces ayant connu, dans le temps, un usage abusif.

Les types de tourisme pratiqués sont le tourisme cynégétique, culturel et de découverte, le tourisme rural intégré étant très peu développé. Le tourisme cynégétique est plus développé et repose essentiellement sur une Zone d'Intérêt Cynégétique (ZIC) vaste de 1 336 000 ha et sur quelques autres zones amodiées (Sadatou ; Goudiry, Médina Foulbé, Ballou, Gabou...). La ZIC a comme principale vocation l'exercice d'activités de chasse. Le tourisme culturel et de découverte est essentiellement noté durant les manifestations culturelles dans des sites historiques ou naturels. Dans le bassin, avec l'absence de chasseurs professionnels, des touristes blancs et quelques autochtones (surtout des hommes en milieu rural) s'y activent. Les principales espèces sont la pintade et le francolin, les singes, les lièvres, les porcs-épics, les phacochères... La viande de brousse est la source principale de protéine animale. Une partie des produits de la chasse est directement consommée et l'autre vendue. Cette pratique a certes des impacts sur la faune, même si elle est difficile à évaluer. La chasse est essentiellement effectuée au moyen de feux de brousse, d'armes traditionnelles et modernes.

XI.5 L'impact des usages sur les ressources en eau

Dans le bassin, les usages en eau sont nombreux et variés : usages domestiques, alimentation en eau potable, abreuvement du bétail, pêche, agriculture, orpillage, exploitation minière, transport, tourisme, loisirs... L'étude des usages d'un bassin comme la Falémé, selon les termes du Fond Français pour l'Environnement Mondial (FFEM, 2005)⁸¹, est complexe du fait du très grand nombre d'usages potentiels. L'analyse des usages permet d'identifier les secteurs en concurrence, le niveau de satisfaction ainsi que les pressions exercées sur les ressources en eau du bassin. Les liens entre les ressources en eau et les usages, qui ont un impact direct dans le bassin, sont donnés par la **Figure 65**. Toutes les activités des usagers d'un bassin ont une influence croissante sur les systèmes hydrologiques (OMM 1994)⁸².

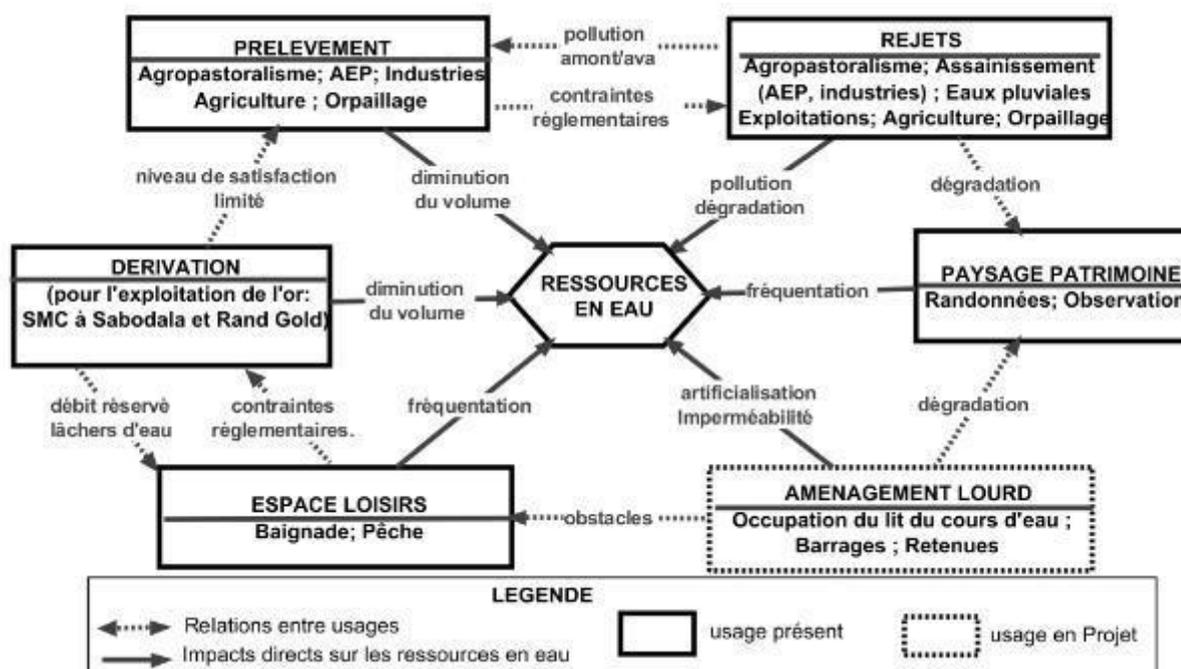


Figure 65 : Actions directes des usages sur les ressources en eau et relations entre usages dans le bassin de la Falémé (inspirée de Charnay B, 2010)⁸³

Différentes relations apparaissent entre les usages et dépendent de la nature de l'action exercée sur les ressources et des dimensions spatio-temporelles de l'usage. Les actions associées à chaque usage mettent en évidence les fortes interactions entre les multiples usages et les aménagements réalisés. Dans le bassin de la Falémé, chaque usage implique une ou plusieurs actions sur la ressource en eau : des actions de prélèvements en eau (lavage de l'or, irrigation, abreuvement du bétail...), des dérivations ou retenues en eau (canal de prélèvement d'eau sur la Falémé en appont au projet à Sabodala par SMC, canal de prélèvement de Rand Gold à Loulo...), des rejets de sources ponctuelles et diffuses (mercure, cyanure, pesticides...), des actions d'artificialisation visant à protéger des usages

⁸¹ Fonds Français pour l'Environnement Mondial, 2005 : Gestion intégrée des zones côtières et des bassins fluviaux.

⁸² OMM, 1994 : Acquisition et Traitement des données, Analyses, Prévision et autres applications. Guides des pratiques Hydrologiques. OMM-N° 168, Organisation Météorologique Mondiale, Genève (Suisse); 829 p.

⁸³ Charnay B., 2010 : *Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de Montagne : le cas du bassin versant du Giffre*, Soutenue le 26 mars 2010, Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Savoie (E.D. SISEO), 504 p

(ouvrages hydrauliques, ouvrages de stabilisation...) ou des aménagements pour stocker l'eau (deux barrages de captage des eaux de ruissellement dont les surfaces drainantes sont respectivement de 20 et de 22 km² à Sabodala).

D'autres actions comme la modification de l'occupation et de l'utilisation des sols du bassin ont un impact indirect tels que les changements des pratiques culturelles, la croissance de l'activité d'orpaillage, la multiplication des sociétés d'exploitation minières, l'augmentation de l'exploitation forestière... (Figure 65). Ces mutations dans le bassin de la Falémé peuvent avoir des effets sur le régime d'écoulement, d'infiltration et de recharge des réserves souterraines du bassin. La demande croissante en eau qui en découle est liée à l'augmentation de la population et à leurs diverses activités très consommatrices d'eau. Outre les incidences sur la quantité d'eau, les activités agricoles peuvent influencer la qualité des eaux du bassin (pollution, salinisation, sédimentation...), ainsi que l'intégrité des écosystèmes aquatiques, même si c'est à faible niveau. Seulement, l'agriculture dans le bassin est traditionnelle, vivrière et céréalière, peu irriguée et de petite étendue, n'utilisant pratiquement pas de pesticides ni d'engrais, d'où un impact moindre sur l'environnement. Pour l'élevage, bien que le pâturage en forêt soit de faible intensité du fait de l'effectif du cheptel peu important, l'exploitation excessive de la biodiversité végétale par le bétail, risque de représenter une menace pour la végétation. L'exploitation forestière pour des besoins de bois de feu ou autres besoins en bois est aussi une source de dégradation de la végétation, ce qui peut influencer sur la nature de l'écoulement dans le bassin. L'étude des différentes relations entre usages et de leur niveau de satisfaction lié aux ressources en eau donne finalement un aperçu des questions de gestion de l'eau dans le bassin de la Falémé (Tableau 109).

Tableau 109 : Actions sur les ressources en eau, niveaux de satisfaction et contraintes principales des usages de l'eau

Usages et usagers (fonctionnalité ou service)	Actions sur les ressources en eau et son impact	Niveau de satisfaction lié aux ressources en eau		Contraintes limitant la satisfaction de l'utilisateur
		Quantité	Qualité	
Alimentation en eau potable (usages domestiques)	Prélèvements eaux de surface et nappes (boisson) ; Rejet direct et dégradation des milieux aquatiques.	Bonne disponibilité en période de crue ; Quelques pénuries d'eau dans le bassin surtout en période d'étiage.	Captages aux normes malgré quelques niveaux de pollution.	Assainissement limité par les capacités du milieu récepteur.
Agriculture (sous pluie, décruée, maraîchage, arboriculture) ; Elevage ; Orpaillage ; Industrie minière	Prélèvements eaux de surface et nappes (abreuvement du bétail, lavage, irrigation) ; Rejets diffus (épandage) et transformation des sols ; Dégradation des milieux aquatiques (zones humides...).		Bonne et satisfaisante globalement.	AEP ; Protection des sources ; Pression foncière dans les endroits proches du cours d'eau.
Végétation (exploitation forestière)	Changements dans le régime de ruissellement.	-----	-----	AEP et protection des sources.
Pêche	Dérivation ; Dégradation des milieux aquatiques.	Usage peu satisfaisant.	Mauvaise qualité liée à la pollution (rejets des eaux domestiques).	Tous les usages économiques.
Milieu aquatique (zones humides)	Ressource locale ; Autoépuration, atténuation des crues ; Autogestion sédimentaire ; Diversité biologique.	Disparition de zones humides ; Morcellement et réduction des zones humides.	Atterrissement des zones humides ; Uniformisation des zones humides.	Pression foncière, impacts de l'occupation du sol.

Dans le cadre d'une gestion, la protection de la biodiversité (animale et végétale) du bassin serait en conflit d'usage avec les différentes utilisations de ressources en eau si les étendues protégées sont importantes. Pourtant, la conservation pour la population locale des droits d'usage que la législation sur l'environnement leur reconnaît, peut ne pas être synonyme de conflit d'intérêts avec la conservation de la biodiversité. En l'absence de mesures, le niveau de satisfaction de chaque usage ne peut être appréhendé qu'à partir d'appréciations subjectives de la part des usagers. Dans le bassin, chaque usage de l'eau semble être contraint par au moins l'une des deux dimensions (quantitative et/ou qualitative) des ressources en eau. De même, des usages sont également limités par l'occupation du sol et d'autres usages, comme les champs de culture sur l'activité pastorale. L'usage le plus vulnérable est la pêche. Dans le bassin, elle a le taux de satisfaction le plus faible du fait de la longue période des étiages et du tarissement, qui limite la continuité biologique (déplacement des poissons).

De même, le **Tableau 109** donne des contraintes qui dépassent les ressources en eau et les usages. Ces contraintes sont liées à la fois au capital humain, aux usages et aux aménagements existants, aussi bien pour le développement économique que pour la protection de l'environnement, malgré les nombreuses potentialités. En raison des multiples activités et aménagements, les usagers ralentissent ou accélèrent les écoulements successifs par le changement de caractéristiques du milieu et ses interfaces au sein des versants (occupation du sol, porosité des horizons pédologiques, drainage...) et des cours d'eau du bassin (Cudennec C., 2005)⁸⁴. Pour limiter ces impacts sur les ressources en eau du bassin de la Falémé, de nombreux principes, approches et lignes directrices générales (fondés sur une série de mesures économiques, règlementaires, techniques ou sociales) ont été définis, allant de la gestion par l'offre (Margat, 1996⁸⁵) ou la demande (Berkoff, 1994⁸⁶) à la gestion intégrée.

Conclusion partielle

Les ressources en eau disponibles dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé sont importantes et diverses. Les conditions de vie d'un très grand nombre de ménages ruraux du bassin sont étroitement liées aux ressources en eau conjointement aux activités économiques diverses (agriculture, élevage, pêche, exploitation minière, transport de passagers...) et donc des sources de revenus. Cette diversité des ressources en eau fait du bassin un point de production avec des espaces qui se présentent comme des lieux d'extraction de produits pour la constitution de revenus des populations locales. Avec des filières plus ou moins organisées, les options d'utilisation s'inscrivent principalement dans le cadre d'une logique de prélèvement reposant sur la conviction que « les ressources sont inépuisables ». Le prélèvement constitue donc un élément clé dans la recherche de ressources d'appoint et assure en partie les besoins de consommation des populations.

⁸⁴ Cudennec C., 2005 : Transfert versus mutualisation des coûts et des risques d'amont en aval – Apports des notions hydrologiques d'échelle, structure, émergence et impact, UMR G-EAU, IRD, Tunis ; p11.

⁸⁵ Margat, J. (1976). Analyse des systèmes aquifères et évaluation des ressources en eau souterraine. 76 SGN 532 AME, BRGM, Orléans (France).

⁸⁶ Berkoff, J. (1994). A strategy for Managing Water in the Middle East and North Africa, The World Bank, Washington, D.C.

L'agriculture, comme activité principale, confirme la grande dépendance des populations vis-à-vis des ressources en eau. L'accroissement de la taille des ménages et du taux de défrichement des terrains et le recours aux produits phytosanitaires sont à l'origine de la dégradation et de la pollution des ressources en eau. L'orpillage est souvent confronté à des difficultés comme la maîtrise de l'eau. L'exploitation minière, considérée comme une opportunité de développement du bassin, affecte, dans ses différentes phases, l'environnement physique et biologique avec des ressources en eaux qui peuvent être soumises à des prélèvements importants. Cela peut entraîner soit un tarissement précoce des cours d'eau et puits villageois, soit une contamination par le cyanure, la chaux, l'acide chlorhydrique, mais également par un drainage minier acide.

Dans le bassin, l'augmentation importante des pressions humaines sur les ressources en eau depuis quelques décennies se traduit par des situations de concurrence très nettes entre secteurs d'utilisation. Cette concurrence autour de l'eau dans le bassin ne semble quasiment pas relever d'éventuelles relations conflictuelles entre exploitants de l'amont et de l'aval du bassin versant partagé (à travers les différents aménagements pratiqués), mais plutôt de la concurrence entre secteurs économiques. Ces concurrences ne se limitent pas au partage des ressources en eau entre différents secteurs économiques. Elles présentent de multiples dimensions : concurrence entre systèmes de production agricoles (sous-pluie ou irrigué), mais aussi concurrence pour l'accès aux ressources les moins coûteuses, les plus facilement mobilisables, les plus permanentes et de meilleure qualité. Les différentes activités recouvrent chacune une place importante dans la mobilisation des ressources monétaires des populations locales et sont souvent à l'origine de la dégradation des ressources en eau.

Dans le bassin de la Falémé, la variabilité des conditions météorologiques associée à la productivité généralement faible de l'agriculture de subsistance représente une menace pour les sociétés rurales. Les pratiques d'exploitation peu rationnelles comme le déboisement, la dégradation des terres, les feux de brousse, le surpâturage, l'utilisation de métaux lourds et de produits toxiques, la faiblesse du dispositif de surveillance de ressources forestières, la faible capacité des collectivités locales et les opérations minières, fragilisent les potentialités biologiques. Ainsi les ressources en eau sont négativement affectées. Les conséquences qui en découlent sont la mauvaise qualité de l'eau, la dégradation des terres, l'augmentation de l'incidence et de la gravité des inondations, l'érosion des sols et la diminution de la capacité de rétention des eaux du bassin.

La gestion intégrée de l'eau par bassin versant a pour finalité la protection et la restauration de la ressource en eau, des écosystèmes qui lui sont associés ainsi que de leurs usages. L'approche par bassin permet de prendre en compte, de l'amont vers l'aval, l'ensemble des facteurs naturels et anthropiques liés aux écoulements⁸⁷. La mise en valeur du bassin de la Falémé constitue une grande priorité du fait des liens de dépendance entre les différents pays (Martel S. *et al.*, 2009⁸⁸) et des multiples enjeux quantitatifs (disponibilité en eau) et qualitatifs (tous les aspects de la gouvernance, de l'économie, de la participation sociale et de l'environnement). La gestion de l'eau ne se limite pas à la seule prise en compte de l'ensemble des fonctions économiques, sociales ou récréatives de l'eau, mais doit intégrer les sensibilités du milieu dans une optique de préservation de sa diversité et de ses potentialités.

XII.1 L'état de la gestion de l'eau dans le bassin et ses contraintes

Dans le bassin de la Falémé, de nombreuses institutions interviennent au niveau local dans la gestion de l'eau. Il s'agit d'abord des institutions coutumières et des institutions locales modernes notamment les regroupements par secteur d'activités tels que les organisations de paysans, d'orpailleurs, de pêcheurs... Ces institutions sont au centre de la gestion des eaux du bassin de la Falémé. Il s'agit des institutions et usagers modernes constitués des structures étatiques et des usagers non étatiques (agricoles, industriels...). La gestion de l'eau du bassin renvoie à des pratiques sociales comme les savoir-faire traditionnels et modernes et les savoirs scientifiques.

Sur le plan coutumier, le statut de l'eau dans les sociétés traditionnelles du bassin de la Falémé est proche de celui de la terre, les deux (eau et terre) étant gérées selon les règles coutumières. Le mode traditionnel de gestion de l'eau reste marqué par une prédominance de la perception culturelle et par une conservation des droits exercés traditionnellement par les collectivités autochtones sur les eaux dans certains villages du bassin avec l'institution du « maître de l'eau ». Ce dernier est une structure traditionnelle de gestion des eaux dont la vocation est de veiller au respect de la réglementation en eau et de résoudre les conflits nés de son utilisation⁸⁹. En même temps chef de la terre qui cumule aussi les fonctions de chef de village, le « maître de l'eau » est une autorité qui a tous les pouvoirs d'administration sur l'eau et la terre. Les pouvoirs sur l'eau reposent sur le contrôle des ressources en eau, l'utilisation des savoirs locaux pour leur protection, l'octroi de simples droits d'usage aux utilisateurs.

⁸⁷ Banque Africaine de Développement, 2000 : Politique de gestion intégrée des ressources en eau, OCOD, 94 p www.afdb.org/.../10000016-FR-POLITIQUE-DE-GESTION-INTEGREE.

⁸⁸ Martel S. *et al.*, 2009 : Les défis de la gouvernance des fleuves transfrontaliers en Afrique : perspective de gestion par bassin versant dans un contexte de pénurie d'eau. Rapport Final, présenté dans le cadre du cours : Éléments de gestion de l'environnement, Maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 18 décembre 2009, 85p

⁸⁹ Traoré S., Le cas du Delta et de la vallée du fleuve Sénégal in « La gouvernance de l'eau en Afrique de l'Ouest », UICN (union mondiale pour la nature), 2004, droit et politique de l'environnement, n° 50, 254 p

Le conseil rural, organe central d'impulsion et de développement local, ne joue un rôle que dans la gestion des forages villageois par l'installation et le contrôle, surtout financier, des comités de gestion des forages. On peut compter aussi des groupements corporatifs de paysans, d'orpailleurs et de pêcheurs. Ces associations corporatives dont le motif de création est le même selon les personnes interrogées, « *s'associer pour être plus fort et plus efficace et avoir des moyens financiers et matériels que les initiatives individuelles n'auraient pas permis d'avoir* », sont aussi des acteurs dans la gestion de l'eau.

Le droit moderne de l'eau est gouverné par le principe de la domanialité publique des eaux. Les utilisateurs sont donc appelés à requérir l'autorisation préalable du seul propriétaire, en l'occurrence, l'Etat. La présence d'institutions de type moderne au niveau local contribue à réguler, à gérer la compétition et les conflits sur l'eau, et à assurer la mission de service public. La SAED, par les contrats de concession et de transfert de gestion des ouvrages et équipements hydro-agricoles, est de droit, au nom de l'Etat, une institution qui participe à la gouvernance de l'eau. Elle contrôle et surveille, au nom de l'Etat, et sur le domaine public fluvial de la Falémé, tous les adducteurs et émissaires (presque absents à la Falémé). Au niveau du bassin, il existe de nombreux exemples de gouvernance locale de l'eau. Le souci d'une bonne combinaison des activités agricoles, pastorales, piscicoles et d'exploitation de l'or, ainsi que l'utilisation de l'eau pour la consommation domestique, entraîne l'implication d'autres institutions (DGPRE, SONES, SDE...) au nom de l'Etat. Ce dernier assure l'administration des ressources en eau du bassin, selon la DGPRE (2007)⁹⁰, par une gestion centralisée (ministères, directions opérationnelles et services centraux), déconcentrée (services extérieurs en relation avec la société civile), décentralisée (transfert de compétence aux collectivités locales) et conventionnelle (coopération internationale). La gestion de la Falémé se fait globalement dans le cadre de la gestion du bassin du fleuve Sénégal.

Le bassin du fleuve Sénégal a fait l'objet, au cours des dernières décennies, d'interventions et d'aménagements hydro-agricoles qui ont profondément modifié son régime naturel. Les réalisations hydrauliques notables dans le haut bassin sont le barrage de Bafing à Tolo (retenue de 520 000 m³) et le barrage du Mafevol à Dounkimagna sur le Bafing (710 000 m³ d'eau) dans la partie guinéenne. Dans la partie malienne, la réalisation la plus notable est le barrage et la retenue de Manantali (retenue de 11 milliards m³) et dans une moindre mesure la centrale électrique de la Chute du Félou en 1929. Dans la moyenne vallée, les interventions hydrauliques majeures concernent le barrage de Fom Gleita réalisé en 1986 sur le Gorgol en Mauritanie. Dans la basse vallée et le delta du fleuve, elles concernent le pont barrage de Richard Toll sur la Taouey (1947), le creusement du canal de la Taouey (dans les années 1970), la construction de la digue entre Bango et Rosso, le barrage de Diama (de 1981 à 1986), la digue de rive gauche entre Diama et Rosso en Mauritanie (1992). On peut citer la construction en

⁹⁰ DGPRE, 2007 : Plan d'action de la gestion intégrée des ressources en eau du Sénégal, Ministère de l'Hydraulique, GWP, Gouvernement du Canada, 61 p

cours du barrage de Félou sur le Bafing et la réalisation envisagée des barrages de Gouina sur le Bafing en aval de Manantali et de Gourbassi sur la Falémé.

Le fleuve Sénégal apparaît ainsi comme l'un des bassins fluviaux sahéliens le plus profondément modifié par des interventions humaines, alors que la Falémé, un de ses affluents, n'a pas encore connu de modifications majeures. Son véritable aménagement est envisagé avec la réalisation du futur barrage de Gourbassi. Dans le bassin, les principales infrastructures hydrauliques se résument en ouvrages hydro-agricoles, barrages de retenues d'eau et équipements hydrauliques. Le plus important aménagement est la réalisation d'un canal de prélèvement d'eau de 40 kilomètres de longueur et des équipements connexes (deux stations de pompage) reliant la Falémé à l'usine aurifère de SMC à Sabodala. La zone de pompage sur la Falémé est située à Findi à 2,5 km du village de Sounkounkou et les prélèvements estimés à 2 000 000 m³/an, soit environ 6 000 m³/jour. Il en est de même pour les prélèvements de Rand Gold à Loulo sur la Falémé. Les autres équipements hydrauliques sont constitués principalement de forages, puits-forages équipés ou non de pompes manuelles et puits traditionnels qui captent les eaux souterraines pour assurer l'alimentation en eau potable des populations. Pour la pratique de l'orpaillage, des aménagements sont réalisés sur le cours d'eau pour faciliter le lavage de l'argile aurifère, en plus du pompage des eaux de la nappe. Pour les populations locales, la gestion a trois (3) finalités liées à leurs activités :

- Disposer de la ressource en qualité ;
- Limiter les pertes ;
- Pouvoir évaluer l'excès d'eau le cas échéant.

Aussi préconisent-elles des aménagements et techniques de conservation des eaux. Ainsi sont réalisées :

- Des digues et diguettes en terre pour collecter les eaux de ruissellement ;
- L'aménagement de mares aux abords du cours d'eau pour stocker de l'eau de cultures de décrue et limiter les inondations des bas-fonds et plaines ;
- L'irrigation qui est une pratique développée pour faire face au déficit pluviométrique.

Cependant, des contraintes de gestion de l'eau sont notées, alors que le bassin continue de faire face à une demande croissante en eau des usages. Le **Tableau 110** donne les contraintes majeures de la gestion des eaux au Sénégal, identifiées par la DGPRE (2007).

Dans le bassin de la Falémé, les contraintes de la gestion de l'eau, selon diverses sources d'informations, sont l'insuffisance des équipements hydrauliques, la non-maîtrise de l'eau à des fins économiques, l'insuffisance des moyens de gestion des ressources en eau et la faible implication des acteurs et usagers dans les politiques de gestion de l'eau.

Tableau 110 : Problèmes majeurs de la gestion de l'eau au Sénégal (Source : DGPPE, 2007)

Problèmes majeurs	Problèmes partiels
Insuffisance de la connaissance et des moyens de gestion des ressources en eau.	L'insuffisance de la connaissance sur les ressources en eau (traditionnelles surtout)
	Des bases de données sur les ressources en eau incomplètes, non intégrées et insuffisamment partagées.
	Des réseaux de mesure (de pluie et de débits) vétustes et de faible couverture.
	Des moyens techniques et humains insuffisants (ressources humaines compétentes mais insuffisantes).
Cadre institutionnel peu favorable à la concertation et à l'implication des acteurs et usagers dans l'élaboration des politiques et la gestion de l'eau.	La forte concentration des pouvoirs de décision et de gestion de l'eau au niveau de l'administration centrale (ministères et agences nationales d'exécution).
	La faiblesse de la coordination entre les acteurs (Insuffisance de la concertation).
	L'absence de cadres de concertation au niveau décentralisé.
	La non-implication ou faible implication des acteurs locaux et usagers dans l'élaboration des politiques et la gestion de l'eau.
Faible capacité de mobilisation des ressources financières pour l'accès et la gestion des ressources en eau.	Les coûts exorbitants de mobilisation de l'eau et l'accès à l'eau très difficile.
	La faiblesse des allocations budgétaires pour la gestion de la ressource en eau.
	Les allocations sur le budget public insuffisantes et irrégulières.
Accentuation des crises et risques liés à l'eau.	Les crises pluviométriques (variabilité de la disponibilité d'eau).
	Les inondations (faible protection des ressources en eau de surface).
	La pollution des eaux de surface (due aux activités agricoles et industrielles).
	La détérioration des systèmes aquifères (baisse des niveaux de la nappe).
	Les autres risques majeurs (comme les maladies hydriques).
Faible application des textes et prise en compte de la GIRE dans les instruments politiques et juridiques sur l'eau,	Une faible incidence des instruments juridiques existants sur la gestion des ressources en eau en raison de leur manque d'application (législation sur l'eau insuffisamment appliquée et inadaptée).
	Une faible place accordée aux droits coutumiers par la législation sur l'eau.
Absence de stratégie opérationnelle de communication et d'éducation sur l'eau.	L'insuffisance de l'information et la maîtrise des contours essentiels.
	Les connaissances vagues ou fragmentaires.
	Les informations sur l'eau insuffisamment capitalisées et vulgarisées

Dans le domaine agricole, le problème qui se pose est une indisponibilité de l'eau ou, dans certains cas, un excès qui sont tous deux néfastes aux activités. Ainsi, la variabilité dans le temps et dans l'espace de la pluviométrie, la pénurie de l'eau, l'épuisement des ressources en eau, la pollution et la dégradation de l'environnement, l'insuffisance de l'investissement en matière de protection de l'eau sont des contraintes à la gestion des ressources en eau. Soumises à des prélèvements souvent importants, plusieurs sources connaissent un tarissement précoce et certaines nappes sont épuisées. Les eaux souterraines peuvent être contaminées surtout par un drainage minier acide. Quant aux eaux de surface du bassin, leur gestion est aussi potentiellement compromise par la pollution (due aux rejets domestiques, agricoles et industriels), l'érosion et l'envasement, la grande variabilité de l'écoulement, la surexploitation des ressources en eau. Ces nombreuses contraintes nécessitent une gestion intégrée des ressources en eau du bassin.

XII.2 L'OMVS, un organisme de bassin pour la gestion de la Falémé

Un organisme de bassin est une table de concertation et de planification d'un bassin avec, comme mandat premier, l'élaboration d'un Plan Directeur de l'Eau. Acteur principal de la gestion d'un bassin, il présente un portrait et un diagnostic du bassin, ainsi qu'un plan d'action (MENV (2004)⁹¹). Les tentatives de mise en place d'une structure de gestion des eaux du bassin, depuis la période coloniale,

⁹¹ MENV, 2004: *La gestion intégrée de l'eau par bassin versant : concepts et application*, Environnement, Québec, Environdoq ENV/2004/0062, Direction des politiques de l'eau, Ministère de l'Environnement, 58 p, téléchargeable sur www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/concepts.pdf

ont abouti le 11 mars 1972 à la mise en place de l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS).

XII.2.1 L'historique de la mise en place d'une structure de gestion des eaux du bassin

L'évolution du processus d'aménagement et de gestion des eaux de la Falémé s'est faite dans le cadre de la gestion concertée du fleuve Sénégal. Les plans d'aménagement et projets de développement des ressources en eau du bassin du fleuve Sénégal (la Falémé y comprise) datent du début du XX^e siècle. C'est donc au cours de la période coloniale que sont mises en place les premières structures communes de gestion du fleuve. En 1934 est créée la Mission d'Etudes et d'Aménagement du fleuve Sénégal (MEAF), puis en 1938 la Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal (MAS) qui deviendra en 1959 un organe commun de mise en valeur du fleuve au service des trois Etats autonomes. En 1960, le Sénégal, le Mali et la Mauritanie accèdent à l'indépendance. Trois ans plus tard (le 25 juillet 1963), les trois Etats riverains, plus la Guinée où le fleuve prend sa source, signent la convention de Bamako pour le développement du bassin du fleuve Sénégal. Cet accord consacre le fleuve Sénégal comme « fleuve international » (y compris ses affluents dont la Falémé) et crée un Comité Inter-états regroupant les quatre pays. Durant les années 1960, des accords relatifs au statut du fleuve sont signés : c'est le cas notamment de la Convention de Dakar du 7 février 1964, puis de la Convention de Labé du 26 mai 1968 qui crée l'Organisation des Etats Riverains du Sénégal (OERS) remplaçant le Comité Inter-états et élargissant le champ de la coopération régionale. L'OERS, à l'instar du Comité préexistant, ne se limite plus à la valorisation du bassin, mais a pour but l'intégration économique et politique de ses quatre membres.

En 1972-73, la sécheresse climatique va accélérer le processus de coopération. Conscients du fait qu'aucune entité de la sous-région considérée séparément ne peut réussir un développement viable et durable, les responsables des trois Etats riverains du fleuve Sénégal, encouragés par les diverses tentatives de l'ancienne puissance coloniale, (notamment avec les études effectuées par la MEAF et la MAS), décident le 11 mars 1972 d'unir leurs efforts dans le cadre de l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS), sans la Guinée qui s'était retirée de l'OERS en 1972. Pour atteindre les objectifs assignés à l'OMVS, les trois Etats décident la construction et la mise en eau de deux grands ouvrages d'intérêt commun sur le fleuve Sénégal qui appartiendraient aux Etats membres de l'OMVS : le barrage de Diama (entre 1981 et 1986) et celui de Manantali, (entre 1982 et 1988). En 1992, le Protocole d'accord-cadre de coopération entre la République de Guinée et l'OMVS est signé, créant un cadre de coopération pour des actions d'intérêt mutuel sur le fleuve, ses affluents et son bassin. Ce cadre permet à la Guinée d'assister aux réunions de l'OMVS en tant qu'observateur. En novembre 2000, un observatoire de l'environnement a été créé et en mai 2002, une charte des eaux signée par les Etats membres de l'OMVS est venue compléter l'arsenal juridique déjà existant. Il faudra cependant attendre mars 2006 pour que la Guinée devienne membre à part entière de l'OMVS.

XII.2.2 L'OMVS et la gestion des eaux du bassin de la Falémé

La mission de l'OMVS dans le bassin de la Falémé, comme sur tout le bassin du fleuve Sénégal, s'accompagne d'une réglementation solide qui permet d'assurer l'exploitation rationnelle et équitable des ressources en eau. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs conventions vont être ratifiées par les Etats membres de l'OMVS dont les plus déterminantes, qui touchent les secteurs de l'utilisation équitable et raisonnable des ressources en eau de la Falémé et de la participation du public, sont la Charte des eaux et le règlement intérieur de la Commission Permanente des Eaux (CPE) ratifiés respectivement par les Etats membres de l'OMVS en 2002 et en 2003 (Sène A.M., 2008)⁹².

Le système réglementaire, politico-administratif et institutionnel de l'OMVS a proclamé, à travers les conventions de base du 11 Mars 1972 et la Charte des eaux du fleuve Sénégal signée en mai 2002 (**Tableau 111**), l'internationalité de la Falémé et fixé les règles d'utilisation des eaux en garantissant la liberté de navigation et l'égalité dans toutes les formes d'utilisation de l'eau (OMVS, 2002)⁹³.

Tableau 111 : Récapitulatif de quelques dispositions de l'OMVS applicables à la Falémé, à l'utilisation de ses eaux et à sa gestion (Source : Convention et Charte du bassin du fleuve Sénégal)

Conventions	Contenu principal	Dispositions applicables à la gestion de la Falémé
La convention relative au statut du Fleuve Sénégal du 11 Mars 1972	Elle proclame l'internationalité du Fleuve, y compris ses affluents ; fixe les règles d'utilisation des eaux en garantissant la liberté de navigation et l'égalité dans toutes les formes d'utilisation de l'eau du fleuve.	<p>Article 1 « Sur les territoires nationaux (...), le fleuve Sénégal est déclaré fleuve international y compris ses affluents dans le cadre des dispositions de la présente Convention. »</p> <p>Article 2 « Les Etats du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal (...) affirmer solennellement leur volonté de développer une étroite coopération pour permettre l'exploitation rationnelle des ressources du fleuve Sénégal et garantir la liberté de navigation et l'égalité de traitement des utilisateurs. »</p> <p>Article 3 « L'exploitation du fleuve Sénégal est ouverte à chaque Etats contractants suivant les modalités définies par la présente Convention. »</p> <p>Article 4 « Aucun projet susceptible de modifier d'une manière sensible les caractéristiques du régime du fleuve, ses conditions de navigabilité, d'exploitation agricole ou industrielle, l'état sanitaire des eaux, les caractéristiques biologiques de sa faune ou de sa flore, son plan d'eau, ne peut être exécuté sans avoir été au préalable approuvé par les Etats... »</p>
La Charte Des Eaux du Fleuve Sénégal de Mai 2002	Elle fixe les principes et modalités de la répartition des eaux entre les usages, ceux de protection et de préservation de l'environnement et enfin les modalités d'examen et d'approbation des nouveaux projets.	<p>Article 2 « La charte des eaux a pour objet de fixer les principes et les modalités de la répartition des eaux entre les différents secteurs d'utilisation ... »</p> <p>Article 3 « La présente Charte s'applique à l'ensemble du bassin hydrographique du fleuve Sénégal y compris les affluents ... »</p> <p>Article 4 « L'utilisation des eaux du fleuve est ouverte à chaque Etat riverain ainsi qu'aux personnes se trouvant sur son territoire (...) dans le respect de la sécurité des personnes et des ouvrages, ainsi que du droit... »</p> <p>Article 5 « Toute répartition des eaux entre les usagers est fixée en prenant en considération la disponibilité de la ressource et en intégrant les éléments suivants : 1°) la coopération sous régionale (...); 2°) la gestion intégrée de la ressource... »</p> <p>Article 10 « Hormis les usages domestiques qui sont libres, le captage des eaux du fleuve est soumis à un régime d'autorisation préalable ou de déclaration ... »</p> <p>Article 16 « Les Etats contractants protègent et préservent l'écosystème du Fleuve, et gèrent la ressource dans le respect des équilibres naturels... »</p>

⁹² Sène A. M., 2008 : Des institutions internationales à l'action locale. A quelles échelles le développement durable est-il efficace ? Le cas des équipements structurants dans le bassin versant du fleuve Sénégal, Thèse de l'Université de Grenoble 1, 588 p

⁹³ OMVS, 2002 : Exemple de gestion concertée d'un bassin versant par trois Etats riverains (Mali - Mauritanie - Sénégal), 23 p

La Charte des eaux du fleuve Sénégal explicite les modalités et les règles à adopter pour parvenir à une réelle préservation de l'environnement du bassin de la Falémé. A travers la ratification de la Charte des eaux du fleuve Sénégal⁹⁴, particulièrement en son article 16 :

- Les Etats riverains du cours d'eau de la Falémé (Sénégal, Mali et Guinée) protègent et préservent son écosystème, et gèrent ses ressources en eau dans le respect des équilibres naturels (surtout des zones humides fragiles) séparément à travers leurs législations nationales, et conjointement par les instruments juridiques de l'OMVS.
- Ils s'engagent aussi à contrôler toute action susceptible de modifier de manière sensible les caractéristiques des régimes hydrologiques de la Falémé, l'état sanitaire de ses eaux, les caractéristiques biologiques de sa faune et de sa flore et son plan d'eau.
- Enfin, ils prennent les dispositions pour prévenir, réduire ou maîtriser les conditions résultant de causes naturelles ou d'activités humaines qui risquent de causer un dommage à l'environnement de la Falémé, à la santé et à la sécurité des populations.

La répartition des eaux de la Falémé doit se faire entre les différents secteurs d'utilisation selon les possibilités. Il n'y a donc pas un partage de la ressource entre les Etats contractants, allouant un certain volume d'eau à chaque Etat (Merzoug M. S., 2005)⁹⁵. L'utilisation des eaux du cours d'eau est ouverte à chaque Etat riverain ainsi qu'aux personnes se trouvant sur son territoire. Les objectifs et missions de l'OMVS dans le bassin de la Falémé sont nombreux et variés (Ould Bedredine, 2009)⁹⁶. Il s'agit, entre autres, de

- Réduire la vulnérabilité des économies des Etats membres face aux aléas climatiques ainsi qu'aux variables externes du bassin de la Falémé ;
- Accélérer le développement économique des Etats membres par la valorisation solidaire des opportunités offertes par le bassin ;
- Réaliser l'objectif d'autosuffisance alimentaire pour toutes les populations du bassin ;
- Sécuriser et améliorer les revenus des populations sur tout l'espace de la Falémé ;
- Préserver l'équilibre global de l'hydrosystème du bassin de la Falémé.

La Conférence des Chefs d'Etat et de Gouvernement⁹⁷ qui est l'instance suprême de l'OMVS, définit la politique de coopération et prend des décisions concernant le développement économique général du bassin de la Falémé. Le Conseil des ministres définit la politique générale d'aménagement de la Falémé, de mise en valeur de ses ressources et de coopérations entre les Etats, alors que le Comité

⁹⁴ OMVS, 2002 : La Charte des eaux du fleuve Sénégal, Conférence des Chefs d'Etats et de Gouvernement, résolution 005/CGEG, 16 p

⁹⁵ Merzoug M. S., 2005 : L'eau, l'Afrique, la Solidarité : une nouvelle espérance, l'OMVS, un cas de développement solidaire, Présence africaine, 189 p

⁹⁶ Ould Bedredine, 2009 : Exemple de gestion concertée et solidaire d'un bassin fluvial Partagé (Guinée, Mali, Mauritanie, Sénégal), Madrid le 06 mai 2009, 31 p

⁹⁷ Dans son fonctionnement, l'OMVS est composée de six (6) organes : la Conférence des chefs d'Etat et de gouvernement ; le Conseil des ministres ; le Haut Commissariat, la Commission permanente des eaux ; le Comité Régional de Planification ; le Comité consultatif.

Régional de Planification est chargé d'émettre un avis consultatif sur le programme d'investissement relatif à la mise en valeur optimale de ses ressources.

Aujourd'hui, dans le bassin de la Falémé, l'OMVS doit faire face à des enjeux multiples⁹⁸ tels que la préservation de la ressource du fait de la dégradation (déforestation, érosion, pollution...), l'absence de données particulièrement dans le domaine de la qualité de l'eau sur quelques tronçons du cours d'eau (la partie guinéenne en particulier), la diversité ethnique et les spécificités culturelles qui sont souvent une contrainte à la réalisation des projets dans le bassin et le manque de préoccupations des trois Etats vis-à-vis de la société civile. Ces différents enjeux sont aussi des défis à relever, ce qui a nécessité l'application de plusieurs programmes par l'OMVS⁹⁹, dont deux, essentiels dans le bassin de la Falémé. Le premier, le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), a pour but de traiter toutes les questions qui peuvent avoir un lien avec la ressource en eau dans le bassin. Le deuxième qui est le Projet de Gestion des Ressources en Eau et de l'Environnement du Bassin du fleuve Sénégal, vise la protection de l'environnement, le suivi de la qualité des eaux du bassin et le traitement des axes hydrauliques dans les Etats. Le plus grand projet de l'OMVS dans le bassin de la Falémé, reste la construction du futur barrage de Goubassi qui aurait comme objectifs (selon OMVS et Union Européenne., 2009)¹⁰⁰: la contribution pour 100 m³/s dans la régularisation des débits du fleuve Sénégal à Bakel pour permettre le développement de l'agriculture irriguée et de la navigation sur le cours d'eau, la production annuelle de 104 GWh d'énergie électrique, le raccordement à Manantali et le stockage de 2 milliards de m³ d'eau. Dans le cadre de l'élaboration d'un plan de gestion intégrée des ressources en eau du bassin de la Falémé, une analyse de son fonctionnement systémique est d'une importance capitale.

XII.3 Le fonctionnement hydrologique du système du bassin de la Falémé

Le fonctionnement hydrologique d'un bassin, dans le cadre de sa gestion, suppose un maillage territorial formé de multiples espaces (ou sous-systèmes) juxtaposés et souvent superposés d'offre et de demande en eau, chacun enregistrant des acteurs et des intérêts particuliers (Ruf T., 2003)¹⁰¹.

❖ L'identification des sous-systèmes

Le fonctionnement d'un bassin fait appel à des briques élémentaires appelées sous-systèmes dont les entrées et les sorties peuvent être identiques, malgré la différence des comportements d'un sous-système à l'autre (Christian F., 2008)¹⁰². Dans le bassin de la Falémé, les sous-systèmes identifiés sont des « Tronçons de cours d'eau » et des « Nappes ». Dans les sous-systèmes « Tronçons de cours d'eau

⁹⁸ Quelle mise en valeur pour le Sénégal ? <http://entre2o.free.fr/?p=320>, consulté le 10/5/2011

⁹⁹ www.inter-reseaux.org/IMG/pdf/OMVS.pdf, consulté le 15/6/2011 : L'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS): un exemple réussi de gestion d'un grand bassin transfrontalier en Afrique de l'Ouest,

¹⁰⁰ OMVS et Union Européenne, 2009: SDAGE du fleuve Sénégal, Rapport de phase 1, Etat des lieux et diagnostic, Août 2009 457/457, 457 p.

¹⁰¹ Ruf T., 2003 : Comprendre le maillage territorial d'un bassin versant, une étape préliminaire pour engager une gestion concertée sur l'eau IRD, Ur044 Dynamiques sociales de l'irrigation, Montpellier, France

¹⁰² Christin F., 2008 : *Etude de la modélisation hydrodynamique de surface et hydraulique souterraine et de leur couplage dans un but d'aider à la gestion des hydrosystèmes aménagés*, Cemagref, UMR 406 Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU) 34196 Montpellier, France

», les entrées (apports provenant de l'amont vers l'aval des affluents, pluies et échanges nappe-cours d'eau) et les prélèvements ne sont pas contrôlables. Les sorties représentent la lame d'eau ou le bilan hydrologique. Pour les sous-systèmes « Nappes » de la Falémé, les entrées, non contrôlables, sont les infiltrations (efficaces et profondes) et les échanges cours d'eau-nappes (**Figure 66**).

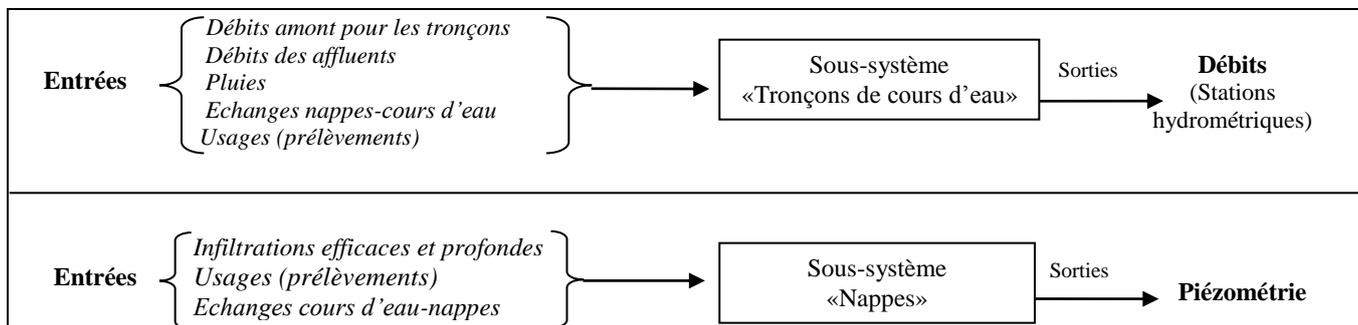


Figure 66 : Schématisation des sous-systèmes « Tronçons de cours d'eau » et « Nappes » (inspirée de Christian F., 2008)

Dans les sous-systèmes « Tronçons de cours d'eau » de la Falémé, contrairement aux entrées ou perturbations subies par l'hydrosystème (qui ne sont pas contrôlables), les sorties sont mesurées, sous forme de hauteurs d'eau, au niveau des trois stations hydrométriques du bassin (Fadoukou, Gourbassi et Kidira). Elles peuvent également être estimées par simulation (ce qui a été fait avec le modèle pluie et débit GR2M). Ces sorties qui sont les débits à l'aval du tronçon du cours d'eau, représentent donc un intérêt pour la gestion de l'eau du bassin de la Falémé. Les barrages, seules entrées contrôlables d'un bassin versant dont on peut connaître et maîtriser leur évolution dans le temps, sont absents du fonctionnement hydrologique du bassin de la Falémé.

❖ Le schéma systémique du fonctionnement hydrologique

L'hydrosystème de la Falémé a un fonctionnement hydrologique qui peut être divisé en unités distinctes. Les données du **Tableau 112** permettent une schématisation du fonctionnement du bassin.

Tableau 112 : Découpage en unités du fonctionnement hydrologique du bassin de la Falémé

Descripteurs	Affluents	Autres apports	Prélèvements	Nappes	ENC et Recharges	
Unité 1	- Kouloun ko	- Apports amont - Pluie - Affluents	- Usages domestiques	Cambrien	Faibles	
	- Kounda ko			Socle	Très faibles	
Unité 2	- Khassaye			Infracambrien	Faibles	
Unité 3	- Balinn ko			- Usages domestiques - Industries	Socle	Très faibles
	- Koila kabé					
Unité 4	-----					
Unité 5	- Gandamaka	- Apports amont - Pluie - Affluents	- Usages domestiques	Infracambrien	Faibles	
	- Dendji			Cambrien		
				Ordovicien		
Unité 6	- Sanankolé			Socle	Très faibles	
				Continental Terminal	Importants	

ENC : Echanges nappes-cours d'eau

La **Figure 67** donne une segmentation transversale du fonctionnement du bassin de la Falémé en six unités, sur la base des « Tronçons de cours d'eau » et « Nappes » identifiés, variables du fait de la différence des paramètres en jeu sur chaque unité. A travers ces briques élémentaires décrites, l'hydrosystème de la Falémé affiche une segmentation transversale de façon linéaire avec chaque tronçon de cours d'eau lié à une nappe au minimum :

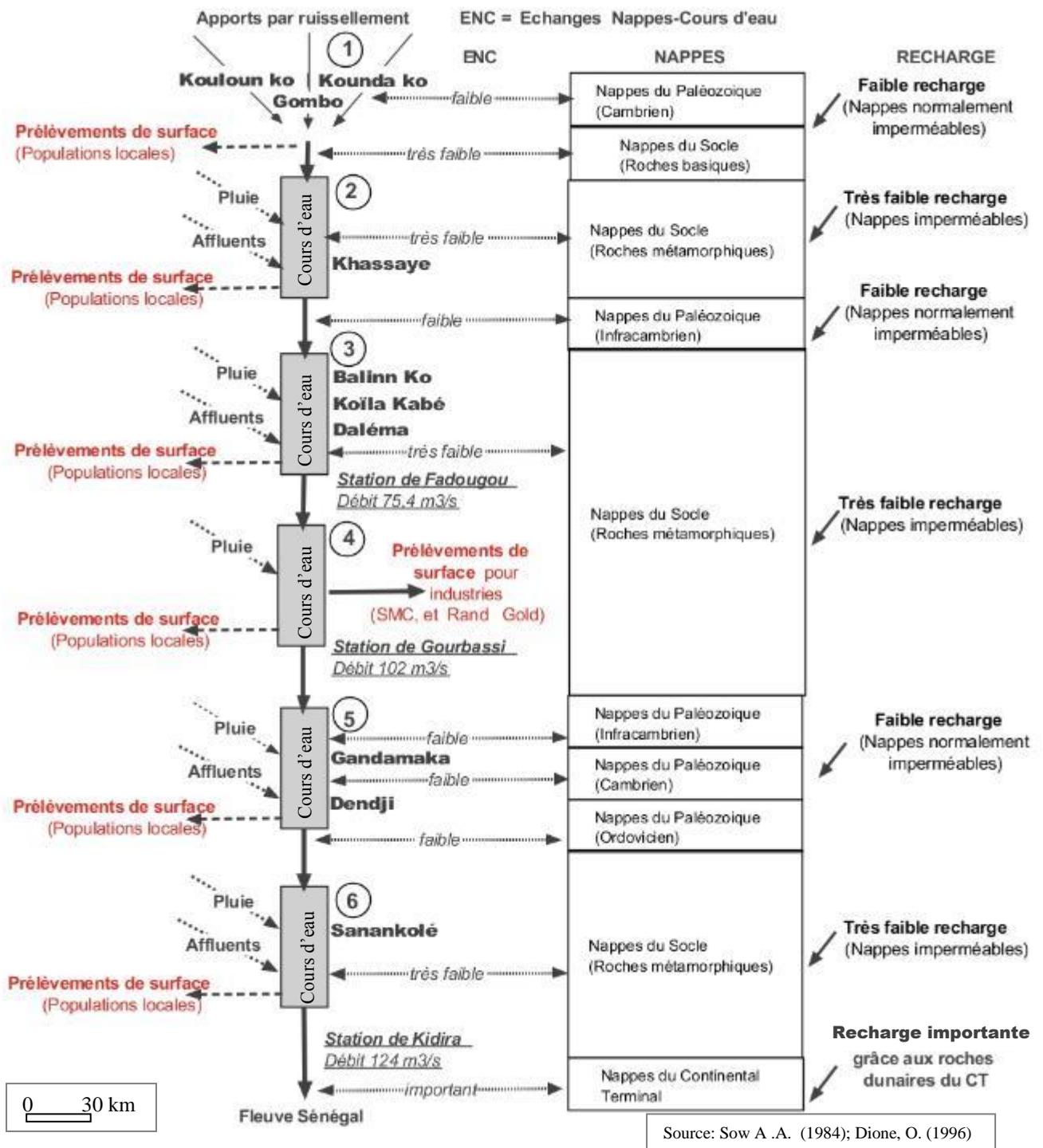


Figure 67: Schématisation du fonctionnement de l'hydrosystème de la Falémé (inspirée de Christian F., 2008)

- La **première unité** est composée des apports du haut bassin qui sont à l'origine de la formation du cours d'eau. Ceux-ci constituent les apports de ruissellement collectés par les affluents du Kouloun

ko, du Kounda ko et du Gombo. Les nappes du paléozoïque et du socle y sont peu connectées aux rivières.

- La **deuxième unité** qui reçoit les eaux du haut bassin est composée du tronçon de cours d'eau entre l'exutoire du haut bassin et la rivière du Khassaye. Il n'y a donc pas d'échanges nappe-cours d'eau importants et l'augmentation des débits provient essentiellement des ruissellements de surface.
- La **troisième unité** qui prolonge la précédente est formée du tronçon de cours d'eau grossi d'abord considérablement par les affluents Balinn ko et Koila kabé qui sont les deux « branches mères » de la Falémé, et par le Daléma. Elle reçoit donc comme apports d'eau généralement les eaux superficielles provenant de l'unité amont car les nappes du socle ne sont pas bien connectées au cours d'eau et les échanges nappe-cours d'eau très faibles. A la station de Fadougou, le débit moyen écoulé est de 75,4 m³/s (1954-2008).
- La **quatrième unité** qui commence à partir de l'exutoire du haut bassin parcourt la totalité du bassin moyen contrôlé par la station de Gourbassi qui enregistre un débit moyen écoulé de 102 m³/s (1954-2008). Les eaux venues du tronçon de cours d'eau amont, représentent l'essentiel des apports d'eau reçus car cette unité est la plus dépourvue en affluents.
- La **cinquième unité** concerne le tronçon de cours d'eau entre l'exutoire du bassin moyen et le début de la poche de la Falémé. Ce tronçon faiblement connecté aux nappes du paléozoïque est grossi par le Gandamaka et le Dendji sur la rive gauche de la Falémé.
- La **sixième unité** est composée du tronçon de cours d'eau qui, après son parcours dans la poche de la Falémé, continue jusqu'à la confluence avec le fleuve Sénégal, à 30 km en amont de Bakel. Ce tronçon est grossi par le Sanankolé, dernier affluent important de rive droite de la Falémé. Il connaît les échanges nappes-cours d'eau les plus importants du bassin du fait de la présence des roches du Continental Terminal. Le débit moyen écoulé est de 124 m³/s à la station de Kidira.

La quatrième unité est la plus importante pour les prélèvements sur la Falémé du fait de l'exploitation industrielle et artisanale de l'or, alors que sur les autres unités, ils sont moins importants (destinés aux usages domestiques). Pour gérer le système hydrologique de la Falémé, l'OMVS est amenée à prendre des décisions (prévoir et agir) et à suivre leur influence sur le fonctionnement du bassin (contrôler).

XII.4 Le système de gestion intégrée des ressources en eau du bassin de la Falémé

Comme le système du bassin de la Falémé, la gestion de ses ressources en eau s'apparente aussi à un système où interagissent quatre sous-systèmes ou facteurs internes (Charnay B., 2010) : les « ressources en eau », l'« aménagement du territoire », les différents « usages » et les différents « acteurs » (**Figure 68**), auxquels s'ajoutent d'autres facteurs externes qui influencent le fonctionnement du bassin.

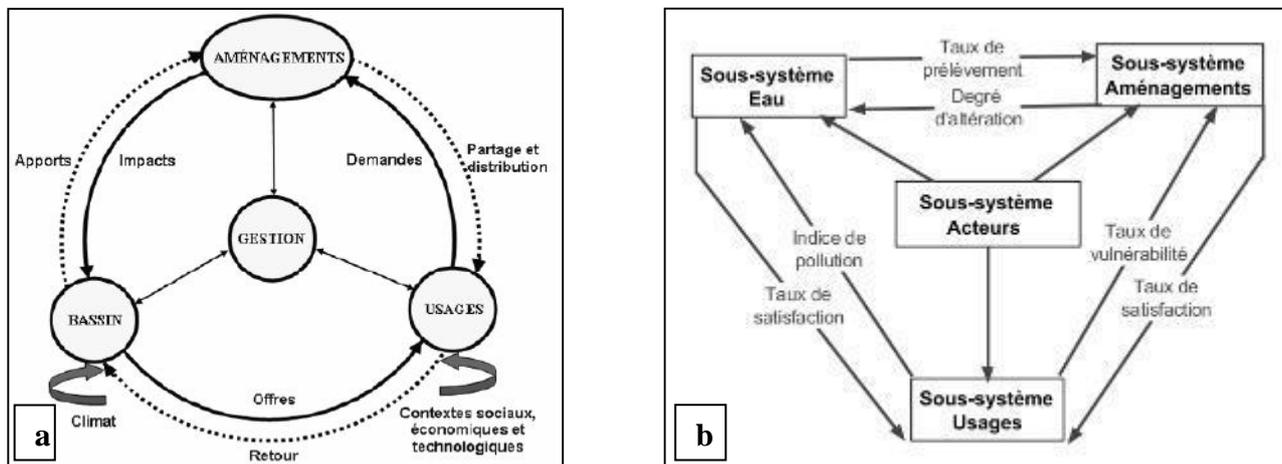


Figure 68 : Composantes du système « gestion de l'eau » d'un bassin : a) Vision thématique de la GIRE (d'après Le Goulven *et al.*, 1999¹⁰³) ; b) Indicateurs physiques du système « gestion de l'eau » (Charnay B., 2010)

▪ Le sous-système « ressources en eau »

Le sous-système « eau » passe par l'évaluation, de l'ensemble des ressources en eau du bassin, donnée par le bilan hydrologique. Les variables d'entrées sont les précipitations et les variables de sortie les écoulements de surface à l'exutoire du bassin et des aquifères. La différence quantitative, qualitative ou spatio-temporelle est liée à plusieurs fonctions de régulation jouées par l'évapotranspiration, la rétention, ainsi que le stockage souterrain (Figure 69).

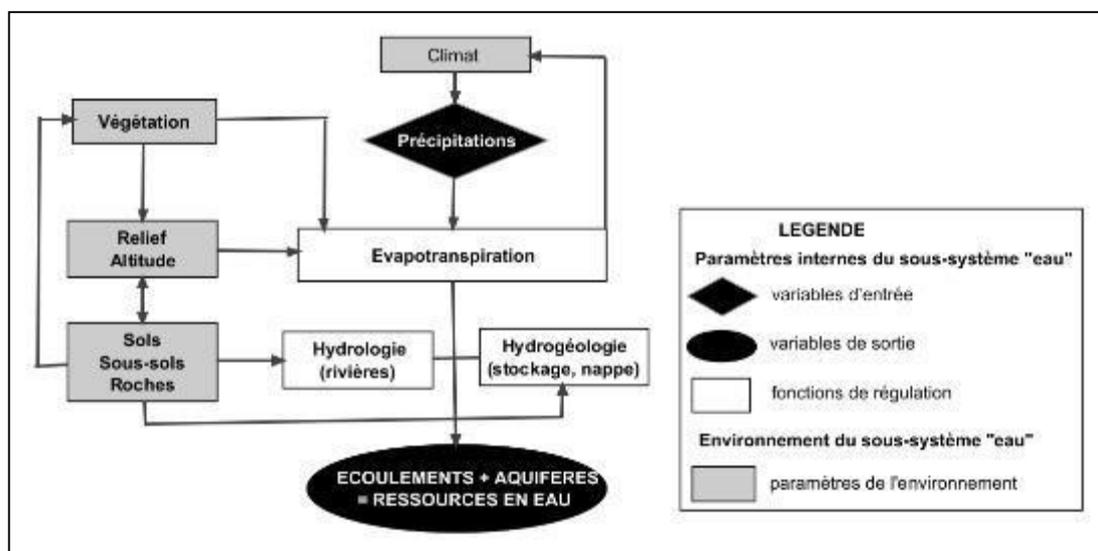


Figure 69 : Sous-système « ressources en eau » et ses paramètres dans le bassin de la Falémé (adaptée de Charnay B., 2010)

Ce sous-système est une « dotation » en eau et en ressources naturelles connexes, à la disposition et au service des usagers. Il reste aussi caractérisé par un ensemble de paramètres naturels dont le premier est le climat. Dans le bassin de la Falémé, les conditions climatiques déficitaires sont à l'origine des étiages longs et sévères, ce qui met en avant la vulnérabilité des ressources en eau dans le bassin. La

¹⁰³ Le Goulven, P. et Ruf, T., 1990 : *L'eau et sa gestion dans la planification de l'irrigation traditionnelle dans les Andes équatoriennes*. Communication aux Journées de l'hydrologie agricole, Editions de l'ORSTOM, Montpellier, France.

période d'étiage constitue l'un des enjeux de la gestion intégrée, car coïncidant avec des périodes stratégiques pour les différents usages : agriculture de décrue, agriculture irriguée, orpaillage, abreuvement du bétail, industrie, usages domestiques...

▪ **Le sous-système « aménagement »**

Les aménagements dans le bassin de la Falémé transforment les écoulements en ressource et déterminent, à la fois, les usages de l'eau et la capacité d'exploitation des ressources disponibles. Les usages de l'eau dans le bassin sont influencés par l'occupation du sol, la croissance des activités économiques, l'augmentation de la population et sa distribution spatio-temporelle. Les usagers du bassin se répartissent la ressource selon les lois et règlements en vigueur. Les capacités d'exploitation, se rapportent aux infrastructures et réseaux mis en place pour utiliser l'eau de la Falémé, la concentration des réseaux d'alimentation en eau potable, les dérivations et barrages...

▪ **Le sous-système « usagers de l'eau »**

Dans le bassin de la Falémé, les prélèvements spécifiques sur la ressource en eau sont nombreux et divers. La **Figure 70** présente les différents usages faits avec l'eau de la Falémé répartis en fonction de base, en fonction économique, en fonction sociale et en fonction écologique :



Figure 70 : Différents types d'usages de l'eau du bassin de la Falémé

- **les usages domestiques** encore appelés **fonction de base** (lessive, vaisselle, alimentation en eau potable, abreuvement du bétail...)
- **les usages productifs** encore appelés **fonction économique** (pêche, maraîchage, orpaillage, exploitation minière et industrielle...)
- **les usages in situ** encore appelés **fonction sociale** qui n'exigent pas de prélèvement (transport, tourisme et loisirs...)
- enfin **les fonctions écologiques** (la présence de la faune aquatique).

Cette diversité des usages de l'eau peut engendrer des conflits entre les usages non consommateurs (tourisme, loisirs, pêche, transport, écosystèmes ...) dont les aspects et l'importance sont difficilement quantifiables et les usages consommateurs (irrigation, orpaillage, industrie, usages domestiques ...).

▪ **Le sous-système « acteurs »**

Le sous-système « acteurs » est un élément fondamental pour comprendre le système « gestion de l'eau » dans sa globalité. Il recoupe tous les acteurs qui interfèrent directement ou indirectement sur le

fonctionnement du système. Ces différents acteurs, aux compétences éclatées, n'ont pas les mêmes motivations : par exemple, certains peuvent ne s'intéresser qu'à la protection des ressources en eau et d'autres à l'amélioration des conditions socioéconomiques du bassin (agriculture, élevage, pêche, orpaillage, industrie minière, commerce, tourisme...). Selon Granjou et Garin (2006)¹⁰⁴, l'identification des acteurs repose sur une grille d'analyse des proximités : proximité géographique (appartenance à un même bassin), proximité organisée (partage de règles, de savoirs, de lieux d'interaction) et proximité cognitive (partage de représentations et d'intérêts). La gestion de l'eau du bassin de la Falémé implique un grand nombre d'acteurs qui peuvent être classés, selon Charnay B. (2010), généralement en quatre grandes catégories en fonction de leur rôle ou compétence dans la gestion de l'eau (**Figure 71**) : acteurs de régulation, de décisions, de réalisations et de la société. Partant des différences de responsabilités dans le bassin, ces acteurs sont, dans le contexte sénégalais, divisés en acteurs de gestion centralisée, déconcentrée, décentralisée et conventionnelle (**Tableau 113**).

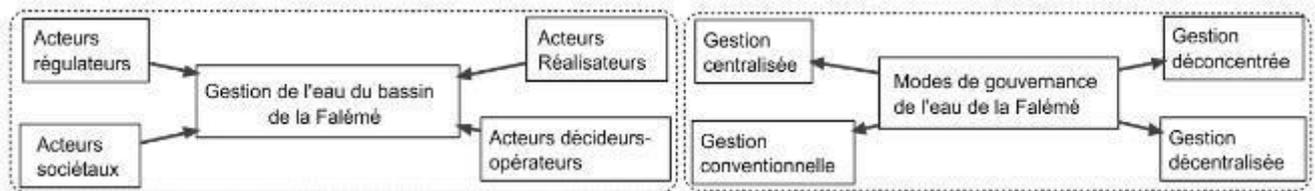


Figure 71 : Types d'acteurs et variantes de modes d'organisation de la gestion de l'eau du bassin de la Falémé

- les **acteurs « régulateurs »** se rapportent aux « institutionnels » qui encadrent la gestion de l'eau. Il s'agit de l'OMVS (acteur principal) et des Etats traversés par le bassin (Sénégal, Mali et Guinée), ainsi que de leurs services centraux, déconcentrés et décentralisés dans le bassin, de leurs établissements publics (Ministères de tutelle, CTE, CSE, PNES, DGPRE...) et de leurs collectivités locales ;
- les **acteurs « décideurs-opérateurs »** concernent les acteurs qui prennent des décisions en matière de gestion des ressources en eau. Ils sont soit publics (services en eau régionaux, départementaux... ; structures : SAED, ISRA, SONES...), soit privés (SMC à Sabadola, Rand Gold à Loulo...) ;
- les **acteurs « réalisateurs »** exécutent les décisions et ont la compétence « études » ou « maîtrise d'œuvre » tels les ONG, les bureaux d'études et les sociétés de l'eau (entreprises rurales ; exploitants du milieu ; sociétés comme la SDE ; ONG comme le CONGAD, la Lumière, ENDA Tiers Monde - Programme Eau Populaire...) ;
- les **acteurs « sociétaux »** regroupent les associations et organisations de producteurs (les associations de pêcheurs et d'orpaillers sont nombreuses dans le bassin), les citoyens, ainsi que les chercheurs et universitaires (hydrologues, géologues, socio-économistes...) qui sont aussi des acteurs sur le terrain.

¹⁰⁴ Graniou C., Garin P., 2006 : Organiser la proximité entre usagers de l'eau : le cas de la Gestion Volumétrique dans le Bassin de la Charente. *Développement Durable et Territoires*, Vol 7, [En ligne], 18 mai 2006.

Tableau 113 : Acteurs du secteur de l'eau du Sénégal pouvant intervenir au bassin de la Falémé

Acteurs	Services concernés
<p>Acteurs au niveau supérieur (gestion centralisée)</p>	<ul style="list-style-type: none"> – le Ministère de l'Hydraulique (MH) qui a pour mission de mettre en œuvre la politique de l'Etat dans la gestion de l'eau au Sénégal; – des autres Ministères intervenant dans le secteur de l'eau : des collectivités locales et de la décentralisation, de l'environnement et de la protection de la nature, de l'agriculture et de l'élevage, de l'assainissement, de la santé publique, de l'équipement, de l'Intérieur, des infrastructures et des transports ; – le Conseil Supérieur de l'Eau (CSE) qui est placé sous l'autorité du Premier Ministre, statue sur les orientations générales du secteur et décide des grandes options d'aménagement et de gestion des ressources en eau ; – le Comité Technique de l'Eau (CTE) qui est chargé d'étudier pour le compte et à la demande du Conseil Supérieur toutes questions relatives à la gestion de l'eau ; - La Société nationale d'aménagement et d'exploitation des terres du Delta et de la vallée du Fleuve Sénégal et de la Falémé (SAED) ; – le Partenariat National de l'Eau du Sénégal (PNES) ; – la Société Nationale des Eaux du Sénégal (SONES) et la Sénégalaise des Eaux (SDE).
<p>Services déconcentrés (gestion déconcentrée et décentralisée)</p>	<ul style="list-style-type: none"> – les Divisions régionales de l'hydraulique (DRH), instances représentatives du Ministère au niveau régional et les subdivisions régionales de maintenance ; – les Brigades des puits et forages (BPF), chargées du suivi de l'exploitation et de la maintenance des forages ; – les Brigades hydrologiques, qui travaillent en relation avec la DGPRE et sont chargées du suivi des eaux de surface ; – les comités de gestion de forage ; les associations d'usagers de forage (ASUFOR) et les associations de consommateurs ; – les associations de jeunes et de femmes (GPF et ASC) ; les associations de pêche et d'orpaillage.
<p>Autres acteurs (gestion conventionnelle)</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Les cellules de coordination de l'Organisation pour la mise en œuvre du fleuve Sénégal (OMVS) ; – la Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO) et l'Unité de Coordination des Ressources en Eau (UCRE) ; – les institutions de recherches et de formation (Universités, IRD) ; – les ONG tels que le CONGAD, la Lumière, ENDA Tiers Monde - Programme Eau Populaire, CREPA: les partenaires financiers et bailleurs de fond ; – les institutions de coopération bilatérales et multilatérales.

La gestion de l'eau comporte des aspects sectoriels faisant intervenir, avec le Ministère chargé de l'hydraulique, d'autres départements ministériels et d'autres institutions publiques ou privées (**Tableau 113**). Cette multiplicité des acteurs constitue une source de dysfonctionnement du système de gestion de l'eau et donc une contrainte majeure pour une gestion rationnelle de l'eau. Une des difficultés majeures est la mauvaise répartition voire l'éclatement des compétences entre acteurs et le manque de coordination entre les structures et services chargés de l'application des politiques dans les pays traversés par le bassin. S'y ajoutent les problèmes de légitimité entre acteurs politiques et administratifs et le risque de double emploi dans les actions. En plus, la Falémé étant un cours d'eau transfrontalier, une intervention parallèle des acteurs des trois Etats traversés par son bassin ne fait qu'accentuer les problèmes de coordination et de partage des compétences. Toutefois, la diversité des

acteurs présente des atouts comme la prise en charge des différents problèmes liés à la gestion des ressources en eau et cela par plusieurs champs disciplinaires. Les pratiques de gestion intégrée évoluent timidement en raison de perceptions différentes. Pour la plupart des acteurs, l'eau est encore perçue comme un support d'usage et les rapports entretenus avec les ressources généralement économiques.

XII.5 La planification d'un cycle de gestion intégrée de l'eau du bassin de la Falémé

La mise en œuvre d'un cycle de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV) nécessite une planification adéquate en six étapes à franchir selon le MENV (2004) dont les quatre premières sont fondamentales : (1) l'analyse du bassin versant ; (2) la détermination des enjeux et des orientations ; (3) la détermination des objectifs et le choix des indicateurs ; (4) l'élaboration d'un plan d'action. Ces quatre étapes de la GIEBV permettent la réalisation du Plan Directeur de l'Eau (PDE).

XII.5.1 Un diagnostic du bassin de la Falémé

Le diagnostic des ressources en eau du bassin est défini comme étant une étude approfondie des problématiques liées à l'eau (l'utilisation de l'eau, la nature des problématiques, leurs emplacements, leurs impacts, leur ampleur dans le bassin versant, etc.)¹⁰⁵. Il constitue une des deux parties de l'analyse du bassin versant (première étape d'un Plan Directeur de l'Eau). L'autre partie, le portrait du bassin versant (qui est une description du bassin et de tout ce qu'il enferme) est déjà donnée aux **CHAPITRE IV** et **CHAPITRE XI**. Le bassin de la Falémé fait face à de multiples problèmes liés à l'eau, qui sont, comme dans tout bassin, d'ordre physique et socio-économique.

▪ Les problèmes d'ordre physique

Les problèmes d'ordre physique (environnemental) résultent de la combinaison de tout un ensemble de facteurs naturels liés directement aux deux pressions majeures exercées, ces dernières années, sur les ressources en eau du bassin : la variabilité et les changements climatiques (Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal, 2007)¹⁰⁶. La baisse de la disponibilité en eau (superficielle et souterraine) et sa distribution spatio-temporelle, jouent un rôle majeur sur l'évolution du bassin de la Falémé, de ses écosystèmes et de son développement socio-économique. Les pressions sur les ressources en eau, ajoutées à celles liées à la démographie galopante et aux activités productives diverses, ont eu des répercussions sur l'environnement naturel du bassin et sur sa diversité écologique. Sur des problèmes environnementaux identifiés dans le bassin du fleuve Sénégal par une Analyse Diagnostique Transfrontalière (ADT, 2008)¹⁰⁷, des problèmes "de disponibilité en eau de surface et en eau

¹⁰⁵ Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC) : <http://www.cobaric.qc.ca/bassin.htm>, consulté le 15/08/2011

¹⁰⁶ OMVS/Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal, 2007 : Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du Fleuve Sénégal, Synthèse Régionale, Composante 3, *Rapport version Publication*, OMVS, Date : juin 2007, 81p.

¹⁰⁷ OMVS, Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal, 2008 : Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problèmes Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal *Version finale*, 133 p

souterraine, de dégradation de la qualité de l'eau du fait de la pollution et de l'exploitation minière, d'érosion, de dégradation des berges et des têtes de source, de maladies liées à l'eau..." apparaissent dans le bassin la Falémé.

L'homme est aussi en partie responsable par des pratiques d'exploitation peu rationnelles telles que l'augmentation du défrichage pour des besoins agricoles, l'exploitation forestière excessive et le déboisement, l'expansion des aménagements et les rejets domestiques, l'exploitation minière intense et l'utilisation de produits chimiques, le surpâturage et les feux de brousse... Ce qui affecte négativement l'état des ressources en eau du bassin. La dégradation qui en résulte entraîne une perte de diversité biologique, la baisse de la disponibilité en eau (plus de 50 %) et de la qualité des eaux, la dégradation des terres, l'augmentation de l'incidence et de la gravité des inondations, l'érosion des sols et la diminution de la capacité de rétention des eaux dans le bassin... Le **Tableau 114** donne une synthèse des causes de la dégradation des ressources en eau et des écosystèmes aquatiques dans le bassin de la Falémé.

Tableau 114 : Différentes causes de la dégradation des ressources en eau dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)

Contraintes	Causes biophysiques	Causes socioéconomiques	Causes institutionnelles	Causes sociopolitiques
Tarissement des sources et baisse de l'hydraulicité des eaux de surface	Faible réalimentation de la nappe et ruissellement rapide provenant de sols dégradés ; Changements climatiques et réduction du volume et de la durée des précipitations.	Pressions sur les terres et exploitation excessive des terres fertiles aux abords du cours d'eau et des rivières.	Absence de structures spécialisées en matière de gestion des ressources hydriques dans le bassin de la Falémé. au-delà de l'OMVS (qui gère le bassin du Sénégal dans sa globalité)	Absence de moyens et de politiques adaptés pour la gestion coordonnée des eaux partagées. Absence d'approches intersectorielles et de services locaux pour lutter contre l'envasement. Politique de gestion des eaux inadaptée
Incidence accrue des inondations.	Ruissellement rapide venant de sols dégradés et des pentes raides.	Absence de structures de maîtrise des inondations.		
Accumulation de sédiments (Envasement)	Charge sédimentaire excessive dans les ruisseaux et les rivières ; Forte réduction périodique des débits du cours d'eau sur certains tronçons.	Empiètement des terres agricoles sur les berges des cours d'eau et les pentes raides ; Excès de labour des terres agricoles ; Surpâturage.		
Faible capacité de recharges des nappes	Changements climatiques ; Réalimentation insuffisante (diminution des précipitations).	Augmentation de la population humaine et animale ; Excès de labour.		
Modification physique, chimique et biologique des eaux.	Pollution hydrique : i) déchets domestiques ; ii) déchets industriels ; iii) produits chimiques et toxiques iv) boues provenant de exploitation minière.	Difficultés à investir dans l'élimination des déchets environnementaux.	Absence de services de décontamination.	Absence de normes d'hygiène et des politiques environnementales.
Réduction des populations, de poissons.	Destruction des habitats et réduction des ressources alimentaires ; Techniques et matériel de pêches impropres.	Activités de pêche excessives, anarchiques et mal contrôlées.	Inefficacité des structures de gestion de la faune aquatique ; Limitation des services d'élimination des déchets ;	Non application des lois, politiques et règlements administratifs. relatifs à l'environnement.
Modification de l'écosystème aquatique.	Modification du régime hydrologique ; Changements climatiques ; Pollution (agricole et industrielle).	Excès de prise de l'eau Non-observation des normes sur les déchets dans les zones industrielles et agricoles.	Faiblesse des services de gestion de l'eau.	

Compte tenu de l'importance des ressources en eau dans toutes les activités économiques, l'exploitation anarchique de l'eau et la détérioration de sa qualité expliquent les nombreuses contraintes.

▪ **Les problèmes d'ordre socioéconomique**

La dégradation des ressources en eau du bassin réduit le développement des activités socio-économiques et contribue faiblement à la productivité économique et au bien-être social des populations.

Tableau 115 : Différentes causes de contraintes liés aux activités de production dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)

Usages	Contraintes	Causes naturelles et techniques	Causes socioéconomiques
Agriculture (sous-pluie ; de décrue ; maraichage)	Agriculture de subsistance ; Dégradation progressive des sols ; Perte de fertilité des sols ; Erosion hydrique et éolienne ; <input type="checkbox"/> Diminution des récoltes ; Déficit vivrier.	Enclavement ; Dégradation des conditions hydroclimatiques ; Attaque des prédateurs singes, phacochères, hippopotames... ; <input type="checkbox"/> Gestion inappropriée des terres de culture ; Absence de pratiques de conservation et de protection des sols.	Variété des semences peu productives ; Faible utilisation de l'engrais et des produits phytosanitaires ; Sous-équipement et matériels rudimentaires ; Inexistence de marchés et loumas ; Divagation du cheptel villageois et transhumance ; <input type="checkbox"/> Forte de croissance démographique.
Elevage	Elevage non productif ; Réduction des zones de pâturage et conflits accrus liés aux ressources naturelles communes ; <input type="checkbox"/> Diminution du cheptel.	Manque d'eau pour le bétail du fait de la sécheresse prolongée ; Déficit organisationnel des éleveurs ; Absence de Législation appropriée ; Gestion inappropriée du bétail.	Troupeaux sous-exploités et vol accru du bétail ; Inexistence de parc à vaccination ; Faiblesse des circuits commerciaux ; Arrivée massive des transhumants ; Coupe abusive des arbres par les transhumants ; Pression démographique et pauvreté.
Pêche artisanale	Baisse de production des pêcheries ; Réduction de la diversité des poissons ; Réduction des passes à poisson.	Changement climatique (basse hydraulité) ; Tarisement précoce des mares et d'une grande partie de la rivière ; Faible application des politiques et des législations sur la protection des espèces.	Pressions démographiques sur les ressources ; Disparition de certaines espèces ; Technique d'exploitation artisanale ; Forte concurrence des pêcheurs maliens ; Forte utilisation des eaux des cours d'eau par le cheptel transhumant et l'exploitation minière (ce qui peut entraîner un assèchement).
Orpaillage	<input type="checkbox"/> Recul des berges ; <input type="checkbox"/> Dégradation très avancée du sol ; Pollution des eaux.	Diminution des débits du cours d'eau ; Assèchement de la Falémé.	Croissance des besoins économiques urgents ; Caractère rudimentaire des outils de travail ; Risques d'agression des femmes par les transhumants.
Chasse	Augmentation du nombre d'espèces en danger ; Diminution du nombre de grands mammifères.	Méconnaissance des questions de biodiversité et des avantages de la conservation de la faune.	Braconnage accru dans le bassin ; Fuite de certaines espèces liée à la présence constante des engins des sociétés et des transhumants ; Excès de déforestation et de labour.
Cueillette	Réduction de la diversité floristique ; Réduction du parc forestier.	Changement climatique ; Surexploitation des ressources.	Mauvaise commercialisation des produits ; Destruction des arbres par les transhumants ; Dégradation du couvert végétal.

Les problèmes d'ordre socioéconomique concernent toutes les activités de production dans le bassin (**Tableau 115**). Le manque d'eau est une contrainte à l'agriculture dans certaines parties du bassin, et oblige les populations à pratiquer des cultures moins exigeantes, mais peu rentables telles que le maïs, le sorgho, le mil, l'arachide... Dans les villages situés près du cours d'eau, l'irrigation est faiblement pratiquée. Le système de production dans le bassin de la Falémé génère des revenus faibles qui n'arrivent pas souvent à couvrir les besoins des populations. En dépit des efforts de gestion des ressources en eau du bassin, la dégradation des ressources en eau continue d'affecter les activités de productions. La pollution constitue une menace pour la santé, les sources de revenu et la sécurité alimentaire. Ces besoins grandissants de la population rendent de plus en plus vulnérables les ressources en eau disponibles, il en résulte une situation socio-économique "difficile", un paradoxe, compte tenu de l'importance des potentialités du bassin. Les régions de Tambacounda et de Kédougou, riches en ressources diverses (hydriques, minières, forestières...), présentent les seuils de pauvreté les plus critiques au Sénégal (Ministère de l'économie et des finances, 2006¹⁰⁸), une situation qui traduit l'image d'un « *mendiant assis sur des lingots d'or* ».

Avec un pouvoir d'achat réduit, les populations du bassin prennent difficilement en charge les frais inhérents à l'exploitation des ressources locales. Par conséquent, ce sont de grands hommes d'affaires et/ou entreprises étrangers comme la SMC à Sabadola, qui monopolisent l'activité et les empêchent ainsi de jouir des retombées de la mise en valeur des importantes potentialités. Celles-ci ne se contentent alors que de maigres ressources (être orpailleurs ou ouvriers dans les entreprises) et sont privées d'accès à ce trésor « inestimable ».

XII.5.2 Des hypothèses de solutions aux problèmes identifiés dans le bassin

Les différents problèmes identifiés, du fait de leur ampleur et de leurs impacts, exigent des solutions urgentes. La détermination des solutions est une partie importante de l'élaboration d'un plan d'action (quatrième étape d'un PDE) pour un plan d'aménagement global.

▪ Les mesures environnementales

Elles concernent la gestion des ressources en eau du bassin. Le **Tableau 116** donne des hypothèses de solutions ou actions prioritaires pour le bassin. Ces options de solutions résultent de l'analyse des causes directes et indirectes des différents problèmes liés à l'eau. Ces mesures doivent s'inscrire dans une gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin. Dans les Etats traversés par le bassin de la Falémé (Sénégal, Guinée et Mali), plusieurs programmes gouvernementaux reposent sur l'utilisation des ressources hydriques pour l'alimentation en eau potable et portent sur la lutte contre la pollution de l'eau, la protection ou la restauration des écosystèmes associés.

¹⁰⁸ Ministère de l'Économie et des finances, 2006 : Enquête Perception Pauvreté au Sénégal (EPPS), Région de Tambacounda.

Tableau 116 : Hypothèses de solutions aux problèmes de dégradation des ressources en eau dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)

Symptômes	Actions prioritaires
Dégradation des berges	<ul style="list-style-type: none"> - Lutter contre l'érosion hydrique et éolienne ; - Protéger la végétation afin que le sol reste couvert pour faire face à la dessiccation et au ravinement ; - Etablir des politiques et des pratiques rationnelles d'utilisation des terres agricoles ; - Promouvoir des programmes de conservation de restauration des sols.
Disponibilité et quantité des eaux de surface et souterraines	<ul style="list-style-type: none"> - Construire le barrage de Gourbassi ; - Aménager des mares ; - Construire des digues de retenue d'eau ; - Améliorer les techniques de fonçage.
Disponibilité et qualité de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer un meilleur contrôle de la qualité des eaux ; - Renforcer le contrôle de la qualité des eaux.
Déboisement	<ul style="list-style-type: none"> - Restaurer et gérer les forêts ; - Encourager la création d'aires protégées et de réserves forestières.
Dégradation des Pêcheries	<ul style="list-style-type: none"> - Elaborer un plan de gestion ; - Réduire les pressions de la pêche ; - Protéger et réhabiliter les zones humides ; - Appliquer la législation sur l'utilisation des terres humides.

▪ **Les mesures socio-économiques**

Pour les contraintes d'ordre socio-économique, des hypothèses de solutions formulées sont données dans le **Tableau 117** pour la réduction de la pauvreté par des actions de restauration et d'aménagement de sources d'eau du bassin capables de générer des revenus et d'améliorer le cadre de vie des populations. Le désenclavement de certains villages, surtout durant la saison pluvieuse, la réhabilitation des pistes et des passes déjà existants sont des actions de développement à mener au profit des usagers du bassin. La création de coopératives et d'associations et la mise en place d'actions de conservation impliquent toutes les populations du bassin. D'autres mesures sont préconisées par les populations, comme l'adduction d'eau potable, la promotion de programmes contre la propagation des maladies hydriques, la sensibilisation sur les maladies hydriques...

Ces options de sécurité alimentaire, s'appuient sur la relance et la diversification des activités de production, la maîtrise de l'eau, l'intensification des systèmes de production, la généralisation des moyens de production adaptés aux systèmes productifs et la promotion des pratiques de gestion durable.

Tableau 117 : Hypothèses de solutions aux problèmes d'ordre socio-économique du bassin de la Falémé en fonction des villages interrogés (Source : Résultats d'enquêtes)

Usages	Actions prioritaires
Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> - Planter une agriculture tournée vers des cultures de rente (amélioration technique) ; - Intégrer l'engrais et des produits phytosanitaires pour la fertilisation et la conservation des sols, des semences améliorées et du matériel agricole moderne ; - Former des unités de transformation de conservation et de commercialisation ; - Mettre en place un système d'irrigation par pompage ; - Former et vulgariser la loi sur le domaine national.
Elevage	<ul style="list-style-type: none"> - Réaliser des puits pastoraux et des retenues collinaires ; - Mener des actions transfrontières pour gérer la transhumance ; - Créer des parcs à vaccination et des soins vétérinaires ; - Redynamiser les circuits commerciaux et intégration de la gestion du bétail et du programme d'irrigation ; - Avoir une meilleure application du décret interdisant la transhumance dans la zone ; - Introduire un élevage rentable avec des races améliorées et promouvoir les cultures fourragères.
Pêche	<ul style="list-style-type: none"> - Installer des barrages de retenue d'eau et politique d'aires protégées ; - Introduire la pisciculture ou une aire fluviale protégée (protection et réhabilitation des zones humides) ; - Améliorer les techniques d'exploitation et instaurer le repos biologique ; - Sensibiliser des pêcheurs.
Orpaillage	<ul style="list-style-type: none"> - Aménager le cours d'eau ; - Avoir une meilleure application des lois sur l'exploitation minière ; - Inciter les orpailleurs à s'organiser ; - Sensibiliser aux effets néfastes des procédés employés et des produits utilisés ; - Réhabiliter des sites d'orpaillage.

XII.5.3 Quelques préoccupations majeures de gestion de l'eau dans le bassin

Les préoccupations majeures (appelées enjeux dans un PDE) sont générales et peuvent intégrer plusieurs problématiques : « *Ce sont généralement les mêmes enjeux qui reviendront du PDE d'une rivière à celui d'une autre* » (ROBVQ, 2004¹⁰⁹). Ces préoccupations ou défis fondamentaux de gestion de l'eau mettent les ressources en eau au cœur des atouts essentiels permettant de relever les défis de l'accès à l'eau pour tous, de la sécurité alimentaire, de la santé publique et de la préservation des écosystèmes dans le bassin de la Falémé. En rapport avec les problèmes identifiés dans le bassin, les enjeux environnementaux concernent la gestion de la ressource (disposer d'une eau satisfaisante en quantité et en qualité) pour assurer les besoins des différents usages, protéger les écosystèmes aquatiques et les milieux naturels du bassin. La sécurisation des populations face aux risques naturels (abondance, pénurie et pollution) et le soutien des activités de production, sont fondamentaux. Pour les

¹⁰⁹ Regroupement des Organisations de Bassin Versant du Québec (ROBVQ 2004 : *L'élaboration du plan directeur de l'eau à l'échelle du bassin versant : Recueil d'information pratique*. 22 p. en ligne <http://www.rivagedumoulin.org/> consulté le 10/8/2010

enjeux environnementaux identifiés par la SDAGE (2009)¹¹⁰, ceux qui intéressent l'hydrologie de la Falémé, ont été évalués en fonction de la situation environnementale et des caractéristiques naturelles et socio-économiques du bassin (**Tableau 118**).

Tableau 118 : Synthèse de l'analyse évaluative d'enjeux liés à l'eau dans le bassin de la Falémé (source SDAGE, 2009)

Pollutions ponctuelles classiques	Pollutions diffuses	Substances dangereuses	Pollution microbiologique	Préservation/gestion ressource pour l'alimentation en eau potable	Equilibre quantitatif de la ressource	Qualité physique et biologique des milieux aquatiques
-	+	+/-	-	+	++	+

« ++ » : effet plus manifeste, « + » : effet manifeste, « +/- » : effet modéré, « - » : effet faible

La diversité des usages de l'eau commande une meilleure gestion du bassin, par la prévention des risques naturels, et la valorisation des ressources en eau de la Falémé, la consolidation et l'enracinement de l'esprit de solidarité, de partage, d'équité et de coexistence pacifique entre les populations et les pays riverains du bassin.

Conclusion partielle

Les conventions, notifiées lors des conférences internationales sur l'eau et le développement durable (Mar Del Plata en Argentine, 1977 ; New Dehli en Inde, 1990 ; Dublin en République d'Irlande et Rio de Janeiro au Brésil, 1992 ; Noordwyk aux Pays Bas, 1994 ; Beijing en Chine, 1996 ; Paris en France, 1998 ; Johannesburg en Afrique du Sud, 2002 ; Marseille en France et Rio de Janeiro au Brésil, 2012), ont permis de définir des principes de la gestion intégrée des ressources en eau en tant que ressource limitée et vulnérable, indispensable à la vie, au développement et à l'environnement. L'eau joue un rôle crucial dans le développement économique des pays traversés par le bassin de la Falémé et dans le maintien des écosystèmes naturels. Les diverses utilisations de l'eau influent sur sa disponibilité en quantité et en qualité. Certains usages peuvent compromettre à la fois le bon fonctionnement du milieu naturel et les autres usages qui en dépendent. Préserver l'eau du bassin, tout en conciliant l'ensemble des usages avec les besoins du milieu naturel, est donc un enjeu d'intérêt général, dans le cadre d'une gestion globale de l'eau à l'échelle du bassin.

La présentation des paramètres du système « gestion de l'eau » et de ses quatre sous-systèmes donne une première lecture des enjeux et intérêts d'une gestion intégrée d'un bassin transfrontalier.

La gestion du système hydrologique de la Falémé prévoit la construction de barrages (comme celui programmé à Gourbassi par l'OMVS) pour la conservation de l'eau. Ce barrage aura un rôle déterminant, dans la fourniture d'eau pour les utilisations domestiques et industrielles, pour l'irrigation, pour la production d'électricité et la maîtrise des inondations et des sécheresses. C'est la gestion quantitative des ressources en eau, impliquant des décisions (prévision et action) et le suivi de l'influence de ces décisions sur le fonctionnement du système (contrôle). Ces mesures vont permettre d'améliorer la gestion des ressources en eau dans le bassin.

¹¹⁰ Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) « Meuse et Sambre », 2009 : Document d'accompagnement n°9 Rapport environnemental du district « Meuse et Sambre » Version 8 - Novembre 2009, www.eau-rhin-meuse.fr/.../Tome%2021..., 91 p, consulté le 16/6/2010

CONCLUSION GENERALE

L'analyse des facteurs stables de l'écoulement montre une partition du bassin de la Falémé en deux entités distinctes : le haut bassin et les bassins moyen et inférieur qui peuvent être confondus en une seule entité. Les modalités de l'écoulement (qui sont étroitement liées aux régimes pluviométriques caractérisés par une irrégularité et une grande variabilité) montrent que le fonctionnement hydrologique du bassin de la Falémé s'inscrit dans un contexte de déficit et de variabilité hydro climatiques. Cette variabilité est perçue à travers la hausse des températures, de l'insolation et de l'évaporation consécutivement à la diminution de l'humidité relative et des totaux pluviométriques.

Les séries pluviométriques analysées montrent des ruptures dès 1964 à la station de Mali en domaine guinéen, entre 1964 et 1971 à Labé dans le même domaine climatique, à Kédougou (plus au Nord en domaine Sud-soudanien), Bakel et à Kidira en domaine Sahélien. Ces ruptures se manifestent par des sécheresses occasionnant des déficits pluviométriques de l'ordre 13.9 % à 30.5 %, ce qui est très élevé et qui a des effets considérables sur les ressources en eau.

Les régimes hydrologiques ont subi de profondes modifications avec d'importants déficits d'écoulement. Les séries hydrologiques montrent que les débits écoulés (comme pour la pluviométrie) ont aussi connu des ruptures notées dès l'année 1970. Les trois stations hydrométriques du bassin enregistrent une baisse (en plus de l'irrégularité) des écoulements qui font que l'on peut parler de sécheresse hydrologique. Les variations relatives de cette baisse sont de l'ordre de 50,8% à la station hydrologique de Fadougou dans le haut bassin, de 56,4% à Gourbassi et 59,3% à Kidira, dans le cours moyen et inférieur du bassin.

L'analyse des formes extrêmes de l'écoulement, que sont les crues et les étiages, confirme la variabilité de l'écoulement. Le tarissement dans le bassin est plus rapide et montre la gravité et la sévérité des étiages dans les deux régimes hydrologiques du bassin à Fadougou dans le domaine tropical de transition, à Gourbassi et Kidira en domaine tropical pur.

L'évaluation des ressources en eau du bassin montre partout la faiblesse des volumes écoulés.

Le modèle hydrologique GR2M appliqué au bassin de la Falémé a permis de quantifier la contribution de chaque sous-bassin à l'écoulement global. Les résultats de la simulation des débits et de leur validation sont satisfaisants avec des performances atteignant 94,6 % en calage et 73,5 % en validation. Le modèle apparaît ainsi comme un bon outil de gestion de ses ressources en eau tant pour les prévisions que pour l'évaluation des risques à l'échelle mensuelle et annuelle. Les incertitudes mineures n'en font pas moins un bon outil de gestion durable des ressources en eau. Il permet en outre : (i) une extension des séries chronologiques et (ii) la prévision des variables hydrologiques.

Le bassin de la Falémé, malgré ses énormes potentialités, fait face aujourd'hui à la dégradation et à l'exploitation anarchique des ressources en eau, à la détérioration progressive de la qualité des eaux et des systèmes aquifères, à la faible protection des ressources. Ce qui peut affecter durablement les différents usages de l'eau et aggraver le risque de conflits du fait de la compétition, des différences de statut et d'influence des différents acteurs, des besoins et intérêts non satisfaits et de la méconnaissance de textes réglementaires qui régissent le régime de l'eau dans le bassin. Dans ce contexte, un cadre juridique approprié pour assurer une meilleure gouvernance de l'eau doit être mis en place, prenant en compte toutes les dimensions de la gestion de l'eau (gestion traditionnelle individuelle et participative) et l'intégration des initiatives régionales (fixées par l'OMVS).

Dans le bassin, la gestion de l'eau se fait selon quatre dimensions : centralisée, déconcentrée, décentralisée et conventionnelle. Les contraintes qui en découlent sont de plusieurs ordres : institutionnel, organisationnel et humain ; législatif et réglementaire ; économique et financier ; technique... Une gestion intégrée dans le bassin de la Falémé présente des avantages qui, selon le ROBVQ (2005)¹¹¹, seront de rassembler les usages et acteurs de la ressource eau pour favoriser la gestion durable de l'eau sur les plans environnemental, social et économique. La gouvernance de l'eau doit passer d'une gestion sectorielle à une GIRE par une révision du cadre réglementaire et institutionnel du secteur de l'eau et un changement profond des mentalités de acteurs et usagers, à travers l'OMVS, d'où la nécessité de l'élaboration du PDE.

Le PDE doit privilégier :

- ❖ La gestion intégrée du bassin que se partagent la Guinée, le Mali et le Sénégal ;
- ❖ La mise en place d'un cadre réglementaire de gestion rationnelle et durable de l'eau, en tenant en compte des enjeux sur le plan environnemental, social et économique.
- ❖ Le développement d'un sentiment d'appartenance à son bassin versant.

¹¹¹ Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ), <http://www.robvq.qc.ca/eau/bassinversant>, consulté le 12/08/2011

BIBLIOGRAPHIE

1. **AGEFORE, 2004** : *Etude d'Inventaire des Ressources de la Biodiversité de l'Aire Transfrontalière du Bafing – Falémé – 2^{ème} phase Tome I Zone de Gale – Limacole. Rapport final AGEFORE avril 2004, 83 p.*
2. **Ambroise B., 1999** : *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant*, Bucarest, Editions HGA, 201 p.
3. **Amoussou E., 2010** : *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*, Thèse de Docteur de l'Université de Bourgoine, 315 p.
4. **Anctil, F., N. Lauzon, V. Andreassian, L. Oudin et C. Perrin, 2006**: *"Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization."* Journal of Hydrology 328(3-4): pp. 717-725.
5. **Anonyme (non daté)** : *Plan directeur de l'eau – Bassin versant de la rivière Saint-Charles – Enjeux, orientations et objectifs*, 9 p.
6. **ANSD, 2005** : *Situation économique régionale de Tambacounda édition 2005* ; Service régional de la statistique et de la démographie de Tambacounda., p 53.
7. **ANSD, 2009** : *Enquête villages de 2009 sur l'accès aux services sociaux de base*, rapport final, Cellule de Suivi du Programme de Lutte contre la Pauvreté (CSPLP), Projet d'Appui à la Stratégie de Réduction de la Pauvreté (PASRP), Union européenne, Dakar, décembre 2009), 45 p.
8. **Ardoin S., 2004**. *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat*, Université de Montpellier II, 440 p.
9. **Ardoin S., Dezetter A., Servat E., 2002** : *Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain*. IAHS Publication., n°274, pp.197-203.
10. **Ardoin, S., Lubès-Niel, E., Servat, E., Dezetter, A., Boyer J.F., 2003** : *Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990*. In : *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* (ed. by Servat E., Najem W., Leduc C. & Shakeel A.). IAHS Publ. 278, pp. 223-228.
11. **Ardoin S., Dezetter A., Servat E., Mahé G., Paturel J.E., Dieulin C., Boyer, J.F, 2003** : *Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grands pas de temps et d'espace*. Int. Conf. on the Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions, Montpellier, France, 1-4 Avril 2003. Poster.
12. **Banque Africaine de Développement, 2000** : *Politique de gestion intégrée des ressources en eau*, OCOD, 94 p.
13. **Bany T., 2002** : *Monographie de la Communauté Rurale de Gathiary*, Arrondissement de Kéniéba, Mémoire de Maîtrise de Géographie, FLSH, Dakar, 138 p.
14. **Bassot J. P., 1963**: *Etude géologique du Sénégal oriental de ses confins guinéo-maliens* Thèse Scie., Clermont-Ferrand, 1963. B.R.G.M. no 40 I 1966, 322 p.
15. **Bassot J.P., 1969** : *Aperçu sur les formations précambriennes et paléozoïques du Sénégal Oriental*. Bull. Soc. Géol. Fr. Série 7, n°11, pp. 160-169.
16. **Batchelor M., Hopkins K., Threlfall E. J., Clifton-Hadley F. A., Stallwood A. D., Davies, R. H. & Liebana, E., 2005**: *Blagenes in clinical Salmonella isolates recovered from humans in England and Wales from 1992 to 2003*. *Antimicrob Agents Chemother* 49, pp. 1319–1322.
17. **Berkoff J., 1994**: *A strategy for Managing Water in the Middle East and North Africa*, The World Bank, Washington, D.C, 72 p.
18. **Bertrand R. et Valenzia J., 1977** : *Méthode de cartographie des milieux naturels du Sénégal : évolution des possibilités agro-sylvo-pastorales*. IRAT/GERDAT, pp 329-339.
19. **Bouleau N., 1999** : *Philosophies des mathématiques et de la modélisation*, Du chercheur à l'ingénieur, Paris, L'Harmattan, pp. 23-24.
20. **Boulet J., 2001** : *Systèmes de production agricole et gestion de l'espace au Sénégal oriental et en Haute Casamance*, Dakar, Programme Sénégal Oriental, 149 p.

21. **Bouroche J.M. et Saporta G., 1980** : *L'analyse des données. 4ème Ed.*, Coll. Que sais-je? Presse universitaires de France, 3ème édition, Masson, collection Géographie, 260 p.
22. **Bravard J. P. et Petit F., 2000** : *Les cours d'eaux, Dynamique du système fluvial* Armand Collin deuxième édition, Paris, 222 p.
23. **Bricquet J. P., Mahé G., Bamba F. et Olivry J. C., 1996** : *Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali)*. L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai, 1995), *IAHS*, n° 238, pp. 157-166.
24. **BRGM, 1962** : *Rapport d'étude hydrogéologique de la région de Kédougou-Bakel*, 42 p, 4 planches.
25. **Browner, C.M., 1996**: « *Watershed Approach Framework* », in *Watershed Management*, R.J. Reinhold, éd. McGraw Hill, pp. 369-384.
26. **Brunet-Moret Y., 1969** : *Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie*. Cah. ORSTOM, série Hydrologie Vol. VI, n° 3, 99 p.
27. **Brunet-Moret Y., 1977** : *Test d'homogénéité*. Cah. ORSTOM, série Hydrologie XIV, n° 2, pp. 119-129.
28. **Burton J, 2001** : La gestion intégrée des ressources en eau par bassin – Manuel de formation, Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie, ISBN 2–89481–010–5, 260 p.
29. **Cheret I., 1967** : *L'Eau (Société, 20)*, Paris, Le Seuil, 1967, un vol. in-8°, 128 p.
30. **Cissé S., 2009** : *Etude du fonctionnement hydrologique du bassin de la Falémé en amont de Kidira application du modèle hydrologique distribué SWATT*, Département de Physique, UCAD. FST, 51 p.
31. **Charnay B., 2010** : *Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de Montagne : le cas du bassin versant du Giffre*, Soutenue le 26 mars 2010, Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Savoie (E.D. SISEO), 504 p.
32. **Christin F., 2008** : *Etude de la modélisation hydrodynamique de surface et hydraulique souterraine et de leur couplage dans un but d'aider à la gestion des hydrosystèmes aménagés*, Cemagref, UMR 406 Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU) 34196 Montpellier, France
33. **COGESAF, 2010** : *Enjeux et orientations, objectifs et indicateurs du Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Saint-François*. 8 p.
34. **Comité de concertation et de valorisation de la rivière Richelieu, 2011** : *Plan directeur de l'eau – Plan d'action 2011-2014 du bassin versant de la rivière Richelieu*. COVABAR, Beloeil, 32 p.
35. **Conseil National de l'Evaluation (CNE), 1996**: *Petit guide de l'évaluation*, Commissariat Général au Plan, 106 p.
36. **Conseil Régional, 2001** : *Plan régional de développement intégré de Tambacounda 2001-2006*, Tome 1 : bilan diagnostic, janvier 2001, 139 p.
37. **Coulibaly A., 1995** : *Milieu naturel et contraintes d'occupation dans la partie sénégalaise du bassin versant de la Falémé*, Mémoire de Maitrise, département de Géographie, UCAD, 104 p.
38. **Cudenneq C., 2005** : *Transfert versus mutualisation des coûts et des risques d'amont en aval – Apports des notions hydrologiques d'échelle, structure, émergence et impact*, UMR G-EAU, IRD, Tunis, 11 p.
39. **D'Auteuil C., 2011** : Le plan d'action du bassin de la Baie Missisquoi, Organisme de bassin versant de la baie Missisquoi, document 1, 69 p.
40. **Dechemi N., T. Benkaci et A. Issolah, 2003**: « *Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous* » *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 16, n° 4, pp. 407-424.
41. **Demarée G. R. et Nicolis C., 1990**: *Onset of the sahelian drought viewed as a climatic fluctuation induced transition*. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc* 116, pp. 221-238.
42. **Dezetter A., 1991**: *Modélisation globale de la relation pluie-débit*. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Docteur-Ingénieur en Mécanique, Génie mécanique, Génie civil. Montpellier, USTL, 422 p.
43. **DGPRES, 2007** : Plan d'action de la gestion intégrée des ressources en eau du Sénégal, Ministère de l'Hydraulique, GWP, Gouvernement du Canada, 61 p.
44. **DHI / Tropis, 2005** : *Elaboration du plan de gestion du lac de Guiers PLT* (Projet Eau Long

Terme) Rapport diagnostic Version : Provisoire, 222 p.

South Africa with UNITAR), Side Event, COP 11 Conference, December 6, Montreal, Canada, 11 p.

45. **DHI/ Tropis, Dacosta H., Coly A., 2007:** *Projet : étude sur la modélisation pluies/débits et la conception d'un système d'alerte précoce contre les inondations dans le haut bassin du fleuve Sénégal*, Rapport mise à jours des connaissances hydrologiques 103 p.
46. **Dia N., 2006 :** *Activités minières et culture cotonnière : l'exemple de la mine d'or de Sabodala au Sud-est du Sénégal*, Mémoire de maîtrise de géographie, UGB, Saint-Louis, 91 p.
47. **Dingman S. L., 1994 :** *Physical Hydrology*, 1st edition. Prentice Hall, Inc. Simon & Schuster, a Viacom Company. Upper Saddle River, New Jersey, pp. 4-5.
48. **Diaouné A., 1982 :** *L'opération Terres Neuves du Sénégal oriental : Etude géographique*. Mémoire de maîtrise, géographie, UCAD, 133 p.
49. **Dione O., 1991 :** *Ecoulement, crue et étiage dans le bassin versant de la Falémé*, Mémoire de Maîtrise de Géographie, UCAD, 148 p.
50. **Dione O., 1992 :** *Sécheresses climatiques dans le bassin versant de la Falémé*. Mémoire de D.E.A., Département de Géographie, Université de Dakar, 132 p.
51. **Dione O, 1996 :** *Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie*. Thèse de doctorat, université Lyon 3 Jean Moulin, 477 p.
52. **Diouf S., 1999 :** *Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental : application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du batholite de Saraya et ses environs*. Dakar : ORSTOM, multigr. Th. : Géol. Appliquée, UCAD, Dakar, 158 p.
53. **Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau, 2007 :** *Projet de mise en œuvre du plan d'action GIRE du Sénégal*, Rapport d'évaluation, Facilité Africaine de l'Eau (FAE), 39 p.
54. **Ekeland I., 1995 :** *Le Chaos*, Flammarion, collection "Dominos", 128 p.
55. **ENDA et CIAT (Winograd, M.). 2005:** *Vulnerability and Adaptation Training and Capacity Building Activities and Tools*. Climate change capacity development (C3D) Project (Mind, Sri Lanka, ENDA, Senegal and ERC, South Africa with UNITAR), Side Event, COP 11 Conference, December 6, Montreal, Canada, 11 p.
56. **Fall E.A., 2009 :** *Le bassin versant de la Falémé : Etude du tarissement à la station de Kidira*, Mémoire maîtrise de Géographie, UCAD, 88 p + annexes.
57. **Fall S. M., Traoré M. B. et Sène, S. 2001 :** « *Problématique de la participation du public à la gestion du fleuve Sénégal : cas de la partie sénégalaise du bassin* ». Rapport de recherche UICN, Juin-juillet 2001, 39 p.
58. **Faye C., 2007 :** *Le lac de Guiers : étude du régime et des bilans hydrologique et hydrochimique : quelles incidences écologique et socio-économique dans la zone*. Mémoire de Maîtrise de Géographie UCAD, 146 p + annexes.
59. **Faye C., 2008 :** *L'hydrologie de la vallée du Ferlo : problématique de la remise en eau à partir du lac de Guiers et impacts sur le milieu (CR de Keur Momar Sarr)*. Mémoire de DEA de géographie, UCAD, 70 p + annexes.
60. **Feller C. et Milleville P., 1977 :** *Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal oriental)*. Cahier ORSTOM, série biologie, vol XII, N°3, pp. 199-211.
61. **Fond Français pour l'Environnement Mondial, 2005 :** *Gestion intégrée des zones côtières et des bassins fluviaux*, Définition de un cadre conceptuel et de critère d'évaluation des projets « Eaux Internationales du FFEM », 76 p.
62. **Frécaut R., 1982 :** *Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviale*, Tome 1. Publ. Université Nancy, 147 p.
63. **Frécaut R. et Pagné P., 1983 :** *Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial* - Masson, Paris, 240 p.
64. **Gangbazo G, 2009 :** *La gestion intégrée de l'eau par bassin versant « fonctionne »-telle vraiment? Résultats d'une enquête mondiale et quelques enseignements pour le Québec*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques de l'eau, 9 p.
65. **MENV, 2004:** *La gestion intégrée de l'eau par bassin versant : concepts et application*, Environnement, Québec, Envirodoq ENV/2004/0062, Direction des politiques de l'eau, Ministère de l'Environnement, 58 p.
66. **Garin P., Montginoul M. et Lunet De Lajonnière Y., 2005 :** *De l'intérêt du concept de*

- gestion intégrée pour les services d'eau : illustration pour deux communes de la moyenne vallée de l'Hérault*. Techniques Sciences Méthodes, vol. 2005, n° 12, pp. 39-49.
- 67. George P. et Verger F., 1996** : Dictionnaire de la géographie. Ed. PUF, 500 p.
- 68. Ghiotti S., 2007**: *Les territoires de l'eau. Gestion et développement en France*. CNRS Editions, Paris, Espaces et Milieux, 246 p.
- 69. GIEC, 1995**, *Seconde évaluation du GIEC: changement de climat 1995* (Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 64 p.
- 70. Gleizes, 1977** : *Les ressources en eau*, Génie Rural, Nov-Déc 1977, pp. 24-34.
- 71. Global Water Partnership, 2000**: *Integrated Water Management*. Comité technique consultatif, Tac Background Paper n°4, Stockholm, 80 p.
- 72. Global Water Partnership, 2004**: *Catalyzing Change: a handbook for developing integrated water resources management (IWRM) and water efficiency strategies*. Stockholm, Elanders, 52 p.
- 73. Global water Partenership, 2005** : *Plans de gestion intégrée des ressources en eau*. Manuel de Formation et Guide Opérationnel Mars 2005 Traduction de l'anglais Juin 2005, 107 p.
- 74. Global Water Partenership, 2008** : *Manuel de gestion des ressources en eau par bassin*, 102 p.
- 75. Goula B. T. A., Savané I., Konan B., Fadika V., Kouadio G.B., 2005**: *Comparative study of climatic variability impact on water resources of N'zo and N'zi watersheds in Côte d'Ivoire* – Sciences & Nature, Vol. 2 (1), pp.10-19.
- 76. Grawitz, M. 2001**. *Méthodes des sciences sociales*. 11e édition, Paris, Dalloz, pp. 245-771.
- 77. Greig I, 2006** : *Le Sénégal oriental à l'aube du développement minier : quels enjeux pour les collectivités locales ?* Mémoire de Master Lettres arts sciences humaines et sociales, Ecole Normale Supérieure de Lettres et Sciences Humaines de Lyon (France), 60 p.
- 78. Gumuchian H. Marois C. Fèvre V., 2000** : *Initiation à la recherche en géographie. Aménagement, développement, territorial, environnement*, ed economica, les presses universitaires de Montréal, 425 p.
- 79. Guerber F., 1986** : *Etude de gestion des Ouvrages Communs de l'OMVS-Observation sur les Rapports Provisoires de Phase 2*. OMVS, Haut-commissariat, Dakar, pp. 6-24.
- 80. Guigo M., Davoine P.-A., Guarniers F., Richard B. et Bailly B., 1995** : *Gestion de l'environnement et systèmes experts*. Masson, coll « géographie », Paris, 181 p.
- 81. Hamby, 1994**: *A review of techniques parameters sensitivity analysis of environmental models, Environmental Monitoring and Assessment* 32. pp.135-154.
- 82. Hanrion C. et Mercky P., 1974** : *Projet pilote des Terres Neuves : Sud Koumpentoum (1/40000)*. –Carte des aptitudes des terres. –Carte d'utilisation actuelle des terres. ORSTOM, vol.1, 75 p.
- 83. Haziza E., 2003** : *Modélisation mensuelle pluie et débit/apport de la spatialisation-cas des données de sols*. Mémoire de D.E.A. Université Montpellier II, 85 p.
- 84. Horton R. E., 1923**: "Accuracy of areal rainfall estimates." *Monthly Weather Review* 51(7), pp 348–353.
- 85. Hubert P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A., 1987** : *Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest*. *Journal of Hydrology* 95, pp. 165-183.
- 86. Hreiche A., 2003** : *Modélisation conceptuelle en climat méditerranéen*. Exemple provisoire et incomplet de thèse de doctorat. Université de St Joseph, Faculté d'Ingénierie. Berouth; UM2.
- 87. KAGERA PGTA non daté**: Suivi et évaluation, Programme de gestion transfrontalière des agroécosystèmes du bassin de la Kagera (PGTA Kagera), 36 p.
- 88. Kane A., 1997** : *L'après-barrages 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, Univ. Dakar, 551 p.
- 89. Kane A., 2005** : *Vulnérabilité climatique et ses conséquences sur les écoulements du fleuve Sénégal*. Regional hydrological impacts of climatic variability. Hydroclimatic variability. Edited by Stewak Franks, T. W. IAHS publication n° 296, ISSN 0144-7815-2005.

90. **Keita B., 1999** : *Agriculture et Orpaillage dans la Communauté Rurale de Saraya, Complémentarité ou Compétition*, Mémoire de Maitrise, Département de Géographie, 71 p.
91. **Klemes V., 1975** : *Applications de l'hydrologie à la gestion des ressources en eau (au niveau de la planification et de la conception)*. Hydrologie opérationnelle Rapport N°4 - OMM N°356, OMM : Organisation Météorologique Mondiale: 121 p.
92. **Klemeš, V., 1986**: *Dilettantism in hydrology: transition or destiny ?* Water Resources Research, 22(9), pp. 177-188.
93. **Klemeš V., 1988**: *A hydrological perspective*. Journal of Hydrology, 100, pp. 3-28.
94. **Kouassi A. M., 2007** : *Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire*. Thèse de Docteur de l'Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 234 p.
95. **Laaroubi H., 2007** : *Etude hydrologique du bassin versant urbain de Rufisque*, Thèse de doctorat de troisième cycle, UCAD, 265 p.
96. **Laborde J. P., 2009** : *Eléments d'hydrologie de surface*, Edition, 2009, 202 p.
97. **Labou A., 1996** : *Les disponibilités en eau dans le Sud-est du Sénégal*, Mémoire de maitrise de Géographie, UCAD, 128 p.
98. **Lamagat J. P. et Bader J. C., 2003** : *Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal*, Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs, Actes de l'atelier du PCSI, 2-3 décembre 2003, Montpellier, France, 14 p.
99. **Lamb P., 1983**: *Persistence of subsaharan drought*. Nature, 299: pp 46-48.
100. **Lambert R., 1973**. *Recherches hydrologiques sur le Sud-Ouest du Bassin de la Garonne*. Doctorat d'Etat, Toulouse, 457 p.
101. **Laraque A., Mahé, G., Orange, D., Marieu B., 2001**: *Spatiotemporal variations in hydrological regimes within central Africa during the XXth century*. Journal of hydrology 245, pp.104-117.
102. **L'Agence de bassin versant des 7, 2010** : *Plan Directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Gatineau*, plan directeur de l'eau 2010-2015, Quebec, 282 p.
103. **Le Berre M., Brocard, 1997** : *Modélisation et espace* », in « Espace, Territoires et Sociétés. Les recherches française en perspectives », Paris, Colloque CNRS, Section 39, 3 nov-1997, pp. 3-9.
104. **Le Goulven, P. et Ruf, T., 1990** : *L'eau et sa gestion dans la planification de l'irrigation traditionnelle dans les Andes équatoriennes*. Communication aux Journées de l'hydrologie agricole, Editions de l'ORSTOM, Montpellier, 12-13 Septembre 1990, 22 p.
105. **Le Lay M., 2006** : *Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydroclimatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à mésoéchelle au Bénin*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 218 p.
106. **Leroux M., 1980** : *Le climat de l'Afrique tropicale*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Dijon 4T, 427 p.
107. **Leroux M., 1992** : *Perception statistique et réalité dynamique. Transport méridien en masse extratropicale, Agglutination anticyclonique et circulation linéaire tropicale*. Publ. A.I.C., vol. 5, pp.145-156.
108. **Leroux M., 1983** : *Le climat de l'Afrique tropicale*, Thèse de doctorat d'Etat, Université, de Dijon, texte : 3 tomes, 1427 p, 1 atlas météorologique et climatologique, 250 cartes.
109. **Leroux M., 1993** : *La circulation zonale dite de « Walker » en Afrique : mythe ou réalité ?*, Publ. A.I.C., vol 6, 4 p, 7 figures.
110. **Leroux M., 2000** : *Dynamique du temps et du climat*. 2^e édition, Paris, Dunod, 367 p.
111. **Leroy M., 2006**. *Gestion stratégique des écosystèmes du fleuve Sénégal. Actions et inactions publiques internationales*. Paris, L'Harmattan, 624 p.
112. **L'Hôte Y., Mahé G., Some B., 2002**: *Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues*. Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 47(4), pp. 563-572.
113. **L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., 2003**: *The 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century*. Reply to discussion. Hydrological Sciences Journal, 48, 3, pp. 493-496.
114. **Liéno G., Sighomnou G., Sigha Nkamdjou L., Malou R., Saos J.L., 1999** : *Caractérisation*

des relations eaux de surface - eaux souterraines en milieu tropical sec : Exemple du bassin de la Néma (Sine Saloum, Sénégal). Sud Sciences Technologies **3**, pp. 39-46.

- 115. Lilia Ben Cheikha et al, 2008 :** *Le bassin versant du Jannet (Tunisie): évaluation des risques d'érosion hydrique* Faculté des Sciences de Tunis. UR Géochimie et Géologie de l'Environnement, université de Tunis, El Manar. 15 p.
- 116. Loup J., 1974 :** *Les eaux terrestres.* Masson, Paris, 171 p.
- 117. Lubès H., Aka, A., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., 1995 :** *Essai de mise en évidence d'une variabilité climatique par application de tests statistiques à des séries chronologiques de débits. Application aux grands fleuves de la Côte d'Ivoire.* In : *Stistical and Bayesian Methods in Hydrological Sciences* (Proc. Int. Conférence. Internationale en l'honneur de J. Bernier, Septembre 1995).
- 118. Maby J., 2003 :** « *Propositions liminaires pour éclairer le concept d'objet géographique* » in Indicateurs, Éditions des Actes d'Avignon, 2003, n°5, 316 p.
- 119. Mahé G., 1992 :** *Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes.* Thèse de doctorat, université Paris XI ORSAY, Paris, 384 p.
- 120. Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C., Wotling G., 2001:** Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46, 2, pp. 211-226.
- 121. Mahé G., Olivry J.C., 1995 :** *Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989.* Sécheresse, 6(1), Paris, pp. 109-117.
- 122. Mahé G., Olivry J.C., 1999:** Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IIa*, vol. 328, pp. 621-626.
- 123. Mahé G. et Citeau J., 1993 :** *Relation océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson Atlantique,* Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique*, n° 94, pp. 34-54.
- 124. Mahé G., Olivry J.C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E., 2000 :** *Relations eaux de surface eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali,* C. R. Acad. Sci. Paris 330, pp. 689-692.
- 125. Makhlouf Z., 1994:** *Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres.* Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 p.
- 126. Margat J., 1976 :** *Analyse des systèmes aquifères et évaluation des ressources en eau souterraine.* 76 SGN 532 AME, BRGM, Orléans (France), 34 p.
- 127. Margat J., 1994 :** *Les ressources en eau : conception, évaluation, cartographie, comptabilité,* Edition BRGM, 144 p.
- 128. Martel S., 2009 :** *Les défis de la gouvernance des fleuves transfrontaliers en Afrique : perspective de gestion par bassin versant dans un contexte de pénurie d'eau.* Rapport Final, présenté dans le cadre du cours :Éléments de gestion de l'environnement, Maitrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 18 décembre 2009, 85 p.
- 129. Mathevet T., 2005:** *Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants.* Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 p.
- 130. Mbodje A., 1968 :** *Le bassin du fleuve Sénégal : Etude géographique,* Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université Dakar, 268 p.
- 131. Mbow C., 2004 :** *Rapport sur les feux de brousse au Sénégal pour la saison sèche de Novembre 2003 à mars 2004,* LERG et Institut des Sciences de l'Environnement (UCAD), 9 p.
- 132. Merzoug M. S., 2005 :** *L'eau, L'Afrique, la solidarité : Une nouvelle espérance.* Paris, Ed. Présence africaine, 189 p.
- 133. Michel P., 1959 :** « *L'évolution morphologique des bassins du Sénégal et de la haute Gambie. Ses rapports avec la prospection minière* ». In *Revue de Géographie physique et de Géologie Dynamique Française*, tome 10, n°5-12, pp. 117-143.
- 134. Michel P., 1973 :** *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique,* doctorat d'Etat, ORSTOM, n°63, 753 p, 170 figures, cartes et photos.

135. **Michel C., 1983** : *Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ?* La Houille Blanche, 1, pp. 39-44.
136. **Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, 1997** : *Plan d'action pour le développement de la région de Tambacounda*, 81 p.
137. **Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, 2005** : *L'état de l'environnement au Sénégal*, CSE, 231 p.
138. **Mouelhi S., 2003** : *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 p.
139. **Mouelhi S., Michel C., Perrin, C. et Andreassian V., 2006a** : *Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited*. J. Hydrol. 328, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022, pp. 283-296.
140. **Mouelhi S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006b** : *Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model*. J. Hydrol. 318(1-4), doi:10.1016/j.jhydrol, pp. 200-214.
141. **Ndiaye A., 1994** : *Les Paramètres de l'Environnement et la pluviogénèse à travers un Système d'Information Géographique Application à l'hivernage 1990 au Sénégal*, Thèse de Doctorat, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 302 p.
142. **Ndiaye P.M., Dia A., Vialette Y., Diallo D.P., N'Gom P.M., Sylla M., Wade S., et Diop E., 1997** : *Données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques nouvelles sur les granitoïdes du Paléoprotérozoïque du Supergroupe de Dialé-Daléma (Sénégal Oriental) : implications pétrogénétiques et géodynamiques*. Journal of African Earth Sciences, vol. 25, n° 2, pp. 193-208.
143. **Ndione J.A., 1998** : *Contraintes et évolution climatique récente du Sénégal oriental, Impact sur le milieu physique*, Thèse de Doctorat de troisième cycle, Département de Géographie, UCAD 413 p.
144. **Ndong J. B., 1999** : *Dynamique des milieux et des activités au Sénégal oriental ; Volet 1, milieu naturel (étude climatique)*, Convention IRD/SODEFITEX/UCAD, Programme Sénégal oriental Dakar, 109 p, annexes.
145. **Niasse M., 2004** : *Prévenir les conflits et promouvoir la coopération dans la gestion des fleuves transfrontaliers en Afrique de l'Ouest*. Vertigo, vol.5 , no 1, p.1-13.
146. **Niasse M., Afouda A. et Amani A., 2004**, *Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation*, UICN, Gland (Suisse) et Cambridge (Royaume Uni), 71 p.
147. **Nicholson S.E, 1980**: *The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa*. Mon. Wea. Rev. 108, pp. 473-487
148. **Nicholson S.E, 1981**: *Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa*. Mon. Wea. Rev. 109, pp. 2191-2208.
149. **Nicholson S. E., 1986**: *The spacial coherence of African rainfall anomalies: Interhemispheric teleconnections*. Journal of Climate and Applied Meteorology 25, pp. 1365-1381.
150. **Olivry J. C., Bricquet J.P., Mahé G., 1993** : *Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ?* AISH pub. n°216, pp. 67-78.
151. **Olivry J. C., Bricquet J. P., Mahé G., 1994** : *De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies ; Dossier de la revue de Géographie Alpine*, n°12.
152. **Olivry J. C., Sircoulon J., 1998** : *Evolution des recherches hydrologiques en partenariat en Afrique subsaharienne : l'exemple des pays francophones*. Revue des Sciences de l'Eau, numéro spécial, pp. 61-75.
153. **OMVS, 1995** : *Etude des problèmes d'environnement et de protection des milieux naturels dans le delta du fleuve Sénégal*, synthèse générale, BDPASCETAGRI, ORSTOM, SECA, AFID, SERADE, 61 p.
154. **OMVS, 2002** : *La Charte des eaux du fleuve Sénégal*, Conférence des Chefs d'Etats et de Gouvernement, résolution 005/CGEG, 16 p.
155. **OMVS, 2002** : *Exemple de gestion concertée d'un bassin versant par trois Etats riverains (Mali - Mauritanie - Sénégal)*, 23 p.

156. **OMVS, 2006** : *Recueil d'instruments juridiques relatifs au fleuve Sénégal*. Dakar, pp. 3-7.
157. **OMVS, Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal, 2007** : *Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du Fleuve Sénégal*, Synthèse Régionale, Composante 3, Rapport version Publication, OMVS, Date : juin 2007, 81 p.
158. **OMVS, Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal, 2008** : *Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problèmes Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal*, Version finale, 133 p.
159. **OMVS, Union Européenne, 2009** : *SDACE du fleuve Sénégal, Rapport de phase 1, Etat des lieux et diagnostic*, CSE/CACG/GINGER/SCP version finale, Août 2009, 457 p.
160. **OMM, 1994** : *Acquisition et Traitement des données, Analyses, Prévision et autres applications*, Guides des pratiques Hydrologiques. OMM-N° 168, Organisation Météorologique Mondiale, Genève (Suisse), 829 p.
161. **Orange D., 1992** : *Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest)*, Sciences Géologiques, mémoire N° 93 U.L.P. C.N.R.S., ORSTOM, 198 p.
162. **Oudin L., 2005** : Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Paris (Antony), 495 p.
163. **Ouédraogo M., 2001** : *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale*. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 257 p.
164. **Ould Bedredine, 2009** : *Exemple de gestion concertée et solidaire d'un bassin fluvial Partagé*, Madrid le 06 mai 2009, 31 p.
165. **Ould Moulaye M. L., 2000** : *La problématique de l'eau du fleuve Sénégal : Solutions et perspectives de coopération et développement entre les Etats riverains*. Thèse de doctorat en sciences, Université de Nice-Sophia Antipolis, Fac. Sciences, 21 p.
166. **OXFAM/IFAN, 2008** : *Rapport de recherche sur les industries extractives au Sénégal (Kédougou)*, août 2008, 99 p.
167. **Pardé M., 1968** : *Fleuves et rivières*. Paris, A. Colin 245 p.
168. **Paturel J. E., Koukponou P., Ouattara F., L'Aour A., Mahé G., Crès J. F., 2002** : *Variabilité du climat du Burkina Faso au cours de la seconde moitié du XXème siècle. Sud Sciences Technologies 8*, pp. 41-49.
169. **Paturel J. E., Ouédraogo M., Mahé G. Servat E., and Dezetter E., 2003**: Utilisation de Modèles Hydrologiques pour évaluer les Ressources en eau de Surface et leur évolution Spatio-temporelle Application à l'Afrique de l'ouest In: Water Resources Systems, Water Availability and Global Change, Proc. Conf. Sapporo, Japan, 2003, IAHS Pub. 280, pp. 117-123.
170. **Paturel J. E., Servat E., Kouamé B., Boyer J.F., Lubès -H., Masson J.M., 1995** : *Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire du Togo et du Bénin* Sécheresse, vol 6, n°1, pp. 95-102.
171. **Paturel J. E., Servat E., Kouamé B., Lubès-H., Fritsch J.M., Masson J.M., 1997** : *Manifestation d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale. Publ IAHS*, n°240, pp. 152-172.
172. **Payraudeau S., 2002** : *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants Méditerranéens*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêt (ENGREF), Montpellier, France, 436 p.
173. **Pélissier P., 1973** : *Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance*, Saint- Yrieix. Imprimerie Fabrègue, 939 p.
174. **Pereira B. S., 1966** : *Note explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/200000ème. Feuilles de Tambacounda et Bakel Sud*. Rapport Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outre-mer, Dakar, 53 p.
175. **Perrin C., 2000** : *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 287 p.

- 176. Petch A., 1985 :** *La planification de la gestion intégrée en Alberta.* Ottawa: Environnement Canada, Direction de la politique et de la recherche sur l'utilisation des terres. Documents n°43, 146 p.
- 177. Pouyaud B., 1987 :** *Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants de l'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques.* In : *The influence of climate change and climate variability on the water resources. Proceedings of a symposium held during the XIX Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics at Vancouver, August 1987* (ed. by Solomon S. I., Beran M. & Hogg W.), . IASH publ. 168 pp. 447-461.
- 178. République du Sénégal / Ministère de l'économie et des finances / Direction de la Prévision et de la Statistique / Service Régional de la Prévision et de la Statistique de Tambacounda, 2006 :** *Situation Economique Régionale de Tambacounda*, Edition 2004, 138 p.
- 179. République du Sénégal, 2003 :** *Loi n° 2003-36 du 24 novembre 2003 portant Code Minier*, 26 p.
- 180. Reynard E. 2000 :** *Cadre institutionnel et gestion des ressources en eau dans les Alpes :* deux études de cas dans des stations touristiques valaisannes. *Revue Suisse de Sciences Politiques*, Vol 6, n° 1, pp 53-85.
- 181. Roche M., 1963 :** « *Hydrologie de surface* » ORSTOM et Gauthier- Villars Ed. PARIS (Cf. chap. III : Le complexe physique du bassin versant).
- 182. Rochette, 1974 :** *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal.* Coll. Mém. ORSTOM, 442 p.
- 183. Roose E., 1977 :** *Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest.* Travaux et documents de l'ORSTOM 78. 108 p.
- 184. Ruf T., 2003 :** Comprendre le maillage territorial d'un bassin versant, une étape préliminaire pour engager une gestion concertée sur l'eau IRD, Ur044, Dynamiques sociales de l'irrigation, Montpellier, ISBN 2-87614-591-X.
- 185. Sagna P., 2000 :** *Le climat in atlas du Sénégal*, Edition jeune Afrique, Paris pp 16-18.
- 186. Sagna P., 2005 :** *Dynamique du climat et de son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique occidentale*, Thèse de doctorat d'Etat es-Lettre, UCAD, 786 p.
- 187. Sambou et al, 2011 :** *Calage et validation des modèles hydrologiques GR4J et GR2M sur le bassin du Bafing en amont de Bafing-Makana : vers l'étude de l'impact du climat sur les ressource en eau de la retenue de Manantali*, journée scientifique du 2IE, Ouagadougou, 6 p.
- 188. Sané A., 2002 :** *Monographie de la communauté rurale de Médina Foulbé, arrondissement de Kéniéba, département de Bakel*, mémoire de maîtrise, géographie, UCAD, 131 p,
- 189. Schaake et al, 2006:** *Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts*, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4, 655–717, 2007, 63 p.
- 190. Sène A. M., 2008 :** *Des institutions internationales à l'action locale. A quelles échelles le développement durable est-il efficace ? Le cas des équipements structurants dans le bassin versant du fleuve Sénégal*, Thèse de l'Université de Grenoble 1, 588 p
- 191. Servat et al, 1997 :** *Modélisation pluie-débit et régionalisation : le programme ERREAU en Côte d'Ivoire.* Edition CEMAGREF, FRIEND, troisième rapport 1994-1997, 431 p.
- 192. Servat E., Paturel J. E., Brou Kouamé, Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubès-Niel H., J.M. Fritsch, Masson J.M., Marieu B., 1998 :** *Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale.* In Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds) : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Country.* Proceedings Conf. Abidjan'98, pub. AISH. n° 252, pp. 323-337.
- 193. Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel, H., Brou K., Masson J.M., Travaglio M., Marieu B., 1999 :** *De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale.* *Revue des sciences de l'eau* 12(2), pp. 363-387.
- 194. Seye F., 2005 :** *Monographie de la Communauté Rurale de Sadatou, Arrondissement de Kéniéba, Département de Bakel, Région de Tambacounda*, Mémoire de Maîtrise, UCAD, FLSH, Département de Géographie, 128 p + annexes.
- 195. SGPRE, 1994 :** *Planification des ressources en eau : bilan diagnostic des ressources en eau du Sénégal*, septembre 1994, Projet MH/PNUD/DADSG-SEN/87/006, 230 p.

196. **SGPRE, 1995** : *Planification des ressources en eau, schéma directeur d'aménagement hydraulique de la zone Sénégal oriental (ZADE N°4)*, MH, mai 1995, Projet MH/PNUD/DADSG-SEN/87/006, 34 p.
197. **SIEREM** : *Système d'Informations Environnementales pour les Ressources en Eau et leur Modélisation*) à l'UMR HydroSciences Montpellier Mai 2005, Fleuve Niger, pp.14-27.
198. **Sighomnou D., 2004** : *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé 1, Cameroun, 279 p.
199. **Singh V. P., 1995**: Watershed modelling. In: Singh P., ed. *Computer models of watershed hydrology*. Colorado, USA: Water Resources Publications, Highlands Ranch, pp. 1-22.
200. **Singh V. P. et Chowdhury P. K., 1985** : "Comparing Some Methods of Estimating Mean Areal Rainfall." *Water Resources Bulletin* 22(2): pp. 275-283.
201. **Sircoulon J., Olivry J.-C., 1986** : *Caractérisation de la sécheresse actuelle en Afrique de l'ouest et centrale (considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières)* In : *Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*, CIEH, Ouagadougou, 20 au 24 mai.
202. **Sockinger P., 1982** : *Analyse Conceptuelle* (Paris, INALCO-MSH, 1982), 26 p.
203. **Sougou A., 1996** : « *Les sécheresses climatiques et les étiages fluviaux au sud-est du Sénégal oriental* », Mémoire de Maîtrise, UCAD, Département de Géographie, 151 p.
204. **Sow A. A., 1982** : *Le Nord-ouest du Sénégal et la sécheresse 1968-1974. Contribution à l'étude des sécheresses en Afrique*. Mémoire de. D.E.A, Univ. Nancy II, 42 p.
205. **Sow A. A., 1984** : *Pluies et Ecoulement dans le bassin du fleuve Sénégal. Contribution à l'hydrologie en domaine fluvial tropical humide africain*. Thèse de doctorat 3e cycle, Nancy II, 442 p.
206. **Sow A. A., 1988** : *Pluie moyenne et moyenne pluviométrique au Sénégal*. In *Annales de la Faculté des Lettres Sciences Humaines, Dakar*, n°18, pp. 151- 171.
207. **Sow A. A., 1988** : *Ecoulement et indices de sécheresse dans le bassin du Niokolo Koba*, In *Annales de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines*, n°19, UCAD, NEA, pp. 153-174.
208. **Sow A. A., 1994** : *Analyse des hauteurs d'eau journalières dans le bassin du fleuve Sénégal*. *Annales FLSH, Dakar*, 27 p.
209. **Sow A. A., 2007** : *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé*, Thèse doctorat d'Etat Es lettres et sciences humaines, UCAD, FLSH, Département de Géographie, 1232 p.
210. **Sylla M., 1992** : *Le minerai sulfure aurifère de Sabodala (Sénégal Oriental) : minéralogie et traitement par voies physique et chimique*, Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Nancy I, 230 p.
211. **TAC, 2000** : **Global Water Partnership (GWP)**, Technical Advisory Committee (TAC) : *La gestion intégrée des ressources en eau 2000*, TAC Background Papers No. 4, 65 p.
212. **Thiessen A.H., 1911** : *Precipitation averages for large areas*. *Monthly Weather Review*, 39 (7): pp. 1082-1084.
213. **Touré B., 2002** : *Monographie de la Communauté Rurale de Gathiary, Arrondissement de Kéniéba*, mémoire de maîtrise, Département de Géographie, FLSH, Dakar, 138 p.
214. **Touré B., 2003** : *Etude de la transhumance dans une zone transfrontalière : cas de la communauté rurale de Gathiary*, mémoire de D.E.A. géographie, UCAD, 71 p.
215. **Traoré, 1995** : *Etude des échanges hydrogéologiques entre les eaux du lac de Guiers et la nappe alluviale superficielle sous-jacente Sénégal* Mémoire de DEA en Science de l'environnement 108 p.
216. **Traoré S., 2004** : Le cas du Delta et de la vallée du fleuve Sénégal in « *La gouvernance de l'eau en Afrique de l'Ouest* », UICN (union mondiale pour la nature), droit et politique de l'environnement, n° 50, 254 p.
217. **Tropica Environmental Consultants, 2006** : *Etude d'impact environnement et social du projet d'exploitation d'or, d'argent et de substances connexes de Sabodala*, Dakar, 184 p.
218. **Tropica Environnemental Consultants, 2008**, *EIES Pipeline Eaux Falémé SMC, Rapport*

d'audience publique dans le cadre de l'étude d'impact environnemental du projet d'installation et d'exploitation d'une conduite de pompages d'eau de la Falémé vers la mine de la Sabodala Mining Company. 176 p.

219. **Ulysse B., 2009** : *Contribution à l'élaboration d'un plan d'aménagement du bassin versant de la rivière Coupe à l'Inde (4^{ème}, 3^{ème} section communale de Dessalines)*, Université d'Etat d'Haïti, Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV), Mémoire de Fin d'Études Agronomiques, 74 p.
220. **USAID, Wula Nafaa, 2010** : *Convention Locale : Plan d'Occupation et d'Affectation des Sols de la communauté rurale de Missirah Sirimana*, avril 2010, 40 p.
221. **Villeneuve M., 1984** : *Etude géologique sur la bordure Sud-ouest du craton Ouest-africain. (La suture Panafricaine et l'évolution des bassins sédimentaires Protérozoïques et Paléozoïque de la marge NW du continent de Gondwana)*. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Marseille, 552 p
222. **Vissin E. W., 2007** : *Impact de la Variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*, Thèse de Docteur de l'Université de Bourgogne, 258 p + annaexes.
223. **Yoba B., 2004** : *Montage et gestion participative des projets de développement rural, Outils et méthodes d'intervention*, Mémoire de 3^e Cycle en agronomie, Ecole Nationale d'Agriculture de Meknes (ENA), Meknes, 215 p.
224. **Young G. J., Dooge J.C.I. and Rodda J.C., 1994**: *Global Water Resource Issues*, Cambridge, Cambridge University Press, 194 p.
225. **Wailliser B., 1977** : *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*. Editions du Seuil, Paris, 245 p.
226. **Weber J., Betsch J. M., Cury P., 1990** : *A l'interface Hommes-Nature : les ressources renouvelables*. Colloque « Recherche et Environnement ». Strasbourg, 24-25 septembre 1990, 14 p.
227. **William D Medina Cervantes, 2004** : *Modeling water quantity and water quality with the SWMM continuous stream flow model under non-stationary land-use condition using GIS*, Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Part in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 161 p.

Liens internet

228. <http://91.121.162.160/glu/FRDIC/DICHYDRO.HTM>, réf. Encyclopédie AXIS, 1993/ M.DACHARRY, consulté le 02/03/2010., **Dacharry M., 1993** : Hydrosystème.
229. <http://historia-mundi.forumculture.net/t51-le-mali-les-malinkes>, consulté le 10/05/2010, *Le Mali: Les Malinkés (2005)*.
230. <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICRESSO.HTM>, consulté le 10/05/2011.
231. <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICRESSO.HTM>, consulté le 15/12/2011, **Margat J. 1995** : Ressource en eau.
232. <http://mappemonde.mgm.fr/num18/articles/art08202.html>, consulté le 12/02/2011. 15 p, *Le bassin versant du Jannet (Tunisie): évaluation des risques d'érosion hydrique*.
233. <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICTARIS.HTM>, consulté le 02/03/2010, **Dacharry M., 1997** : *Dictionnaire Français d'Hydrologie*.
234. <http://www.cobaric.qc.ca/bassin.htm>, consulté le 15/08/2011 : **Comité de bassin de la rivière Chaudière**.
235. http://www.eaufrance.fr/?rubrique24&id_article=84, consulté le 10/05/2010, **SDAGE, 1996** : *Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux*.
236. <http://www.eau-rhin-meuse.fr/.../Tome%2021...>, 91 p, consulté le 16/06/2010, **SDAGE « Meuse et Sambre », 2009** : *Document d'accompagnement n°9 Rapport environnemental du district « Meuse et Sambre »* Version 8 - Novembre 2009,
237. <http://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=DF9EE875-1>.
238. <http://www.elements.nb.ca/theme/estuaries/pwmg/eric.htm>, **Arseneau E., 2004** : *Le concept de gestion par bassin versant, nouvel outil de gestion socio-économique*, Groupe de surveillance du bassin de la Petitcodiac (Pwmg-GSBP Inc.) Juin 2004, consulté le 15/05/2011.
239. <http://www.entre2o.free.fr/?p=320>, consulté le 10/5/2011, **Quelle mise en valeur pour le Sénégal ?**

240. <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/0303sp1.htm>, **FAO Focus, 2003** : Gestion de l'eau: horizon 2030, consulté le 10/5/2011.
241. <http://www.fao.org/docrep/008/a0400e/a0400e00.htm>, **FAO, 2005**: *Global Forest Resources Assessment 2005*. Toward Sustainable Forest Management. FAO. Forest Paper 147. Rome, consulté le 10/5/2011.
242. http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/.../F_Kagera_French_.pdf. consulté le 02/01/2012.
243. <http://www.gwpforum.org/gwp/library/TAC4fr>. consulté le 05/03/2010.
244. <http://www.fire.uni-freiburg.de/GlobalNetworks/Africa/Senegal-Rapport-Feux-2003-2004.pdf>, consulté le 12/06/2011.
245. <http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf/OMVS.pdf>, consulté le 15/6/2011 : **L'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS)**: Un exemple réussi de gestion d'un grand bassin transfrontalier en Afrique de l'Ouest.
246. <http://www.lematin.ch/actu/monde/milliers-denfants-travaillent-mines-dor-africaines-39693>. Consulté le 11 avril 2, **Le Matin Bleu, 2008** : TENKOTO, Sénégal, Des milliers d'enfants travaillent dans les mines d'or africaines le 03 septembre 2008.
247. <http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/plan-dir.pdf>, consultée 05/04 2010. **Gangbazo G., 2004** : *Élaboration d'un plan directeur de l'eau : guide à l'intention des organismes de bassins versants*, Ministère de l'Environnement, Québec. 71 p.
248. <http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/fiches/sommaire.pdf> (page consultée en mai 2010), **Gangbazo G., 2006** : *Guide pour élaboration d'un plan directeur de l'eau* : sommaire, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, 12 p.
249. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/fiches/voie-dd.pdf> (page consultée en avril 2010), **Gangbazo G., 2006** : *La gestion intégrée de l'eau par bassin versant : une voie d'expression du développement durable*.
250. <http://www.minfinances.sn/pauvrb02.html>, consulté le 10/05/2011, **Ministère de l'Économie et des finances, 2006** : Enquête Perception Pauvreté au Sénégal (EPPS), Région de Tambacounda.
251. http://www.nodesway.com/tableau_de_bord/princip-e-tableau-de-bord.htm, consulté le 27/04/2011.
252. <http://www.cbjc.org/AxisDocument.aspx?id=552...fr> . **Corporation du Bassin de la Jacques-Cartier 4755**, route Fossambault, Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (Qc) G3N 1T7 *Qu'est-ce qu'un PDE?*, consulté le 19 mai 2011.
253. <http://www.pangeaminerals.org/gold/bambouk/guyane.htm>, consulté le 27/04/2011, **L'or du Bambouk (Mali - Sénégal)**.
254. http://www.rechercheparticipative.org/comment_03.html, consulté le 10/05/2010, **Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), 2008** : Petit guide d'évaluation participative à l'intention des initiatives de développement des communautés.
255. <http://www.riob.org/gwp/handbook/GWP-RIOBManuelDeGIREparBassin.pdf> (Page consultée le 21 novembre 2010), **Réseau International des Organismes de Bassin (RIOB), 2009** : Manuel de Gestion Intégrée des Ressources en Eau par Bassin. RIOB.
256. <http://www.rivagedumoulin.org/> consulté le 10/8/2010, **Regroupement des organisations de bassin versant du Québec (ROBVQ 2004)** : *L'élaboration du plan directeur de l'eau à l'échelle du bassin versant : Recueil d'information pratique*. 22 p.
257. <http://www.robvq.qc.ca/eau/bassinversant>, consulté le 12/08/2011, **Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ)**.
258. <http://www.tambacounda.info/environnement/mines-dor-de-kedougou-les-orpailleurs-exposes-a-lintoxication-au-mercure.html>, consulté le 27/04/2011., **Niang K., 2008** : Les aspects socio-économiques de l'orpaillage dans la région de Kédougou 23 sept. 2008.
259. <http://www.tela-botanica.org/actu/article832.html>: « Quand les mines d'or minent la nature » Mis en ligne dimanche 26 février 2006 par **Daniel Mathieu – Brèves de l'Actualité Actu Nature FNE/ N° 36 - 10** février 2006, consulté le 27/04/2011.
260. http://www.unesco.org/water/wwap/partners/index_fr.shtml, consulté le 27/04/2011
261. http://www.unesco.org/water/wwap/partners/index_fr.shtml, consulté le 5/5/2010, **ONU/UNESCO** : *Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau pour le développement, le renforcement des capacités de l'environnement*.
262. <http://www.volle.com/travaux/modelisation2.htm>, consulté 12/08/2011, **Volle M, 2004** : *A propos de la modélisation*.
263. http://www.wmo.int/wcc3/bulletin/57_3_en/57_3_lins_fr.html#top, consulté 21/08/2011, **Lins H. F., 2008** : Evaluation des ressources en eau: un impératif, Bulletin de l'OMM 57 (3), Juillet 2008/159.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES DANS LE TEXTE

Figure 1 : Courbes d'étalonnage des stations de Kidira et de Gourbassi de 1950 à nos jours	39
Figure 2 Exemple de double cumul entre stations pour l'homogénéisation des données pluviométriques	43
Figure 3 : Exemple de correction d'une cassure dans les séries pluviométriques par la méthode des doubles cumuls (Sow A.A 1984, 2007)	44
Figure 4 : Architecture du Modèle GR2M (Source : Mouelhi, 2003).....	51
Figure 5 : Schéma du cycle de gestion intégrée de l'eau par bassin versant (Source : MENV, 2004 adaptée)	55
Figure 6 : Coupe schématique du relief des hauts bassins (région de la Falémé) portant des lambeaux cuirassés de vieilles surfaces (Source Michel, 1973, adaptée au bassin)	68
Figure 7 : Profil en long schématique du bassin versant de la Falémé (Rochette, 1974).....	69
Figure 8 : Hypsométrie du bassin de la Falémé (Source : Sow A.A., 2007).....	71
Figure 9: Représentation graphique de l'Analyse en Composantes Principales	76
Figure 10 : Evolution mensuelle de la pluie dans le régime pluviométrique guinéen (1950-2004).....	96
Figure 11 : Evolution mensuelle de la pluie dans le régime pluviométrique sud soudanien (1950-2008).....	97
Figure 12 : Evolution mensuelle de la pluie dans le régime pluviométrique nord soudanien (1950-2008).....	99
Figure 13 : Stations pluviométriques selon la latitude et la hauteur de pluies moyennes 1950-2008.....	102
Figure 14 : Variations des indices des trois vecteurs régionaux et du vecteur Falémé de 1951 à 2006.....	104
Figure 15 : Evolution des précipitations exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique selon la méthode de Lamb (PH : Période Humide, PS : Période Sèche)	105
Figure 16 : Test de Pettitt appliqué aux séries pluviométriques annuelles (1923-2004) : a- Labé ; b- Kédougou ; c- Kéniéba ; d-Kidira.	108
Figure 17 : Ajustement statistique des pluies annuelles à trois stations du bassin (1951-2008).....	109
Figure 18 : Fréquences et directions des vents à la station de Labé (1971-2004).....	113
Figure 19 : Fréquences et directions des vents à la station de Kédougou (1970-2007)	114
Figure 20 : Fréquences et directions des vents à la station de Tambacounda (1970-2007)	115
Figure 21 : Courbes de la vitesse moyenne du vent dans le bassin (période 1970-2007).....	116
Figure 22 : Courbes de l'insolation moyenne mensuelle dans le bassin (période 1970-2007)	117
Figure 23 : Courbes des températures moyennes mensuelles en °C à Labé (1971 -2005), Kédougou (1961 -2007), Tambacounda (1950 -2007) et Bakel (1981 -2004).....	119
Figure 24 : Courbes de l'évaporation moyenne mensuelle du bassin (période 1970-2007)	120
Figure 25 : Courbes de l'humidité relative maximale (UX), minimale (UN) et moyennes (UM) annuelles du bassin (1970-2007).....	121
Figure 26 : Répartition spatiale des précipitations moyennes mensuelles sur le bassin.	125
Figure 27 : Hydrogramme de crue évolution mensuelle des débits moyens et des CMD à Fadougou (1954-2007)	136
Figure 28 : Evolution des écarts moyens des débits et de l'hydraulicité en % à la station de Fadougou (1954-2007).....	139
Figure 29 : Hydrogramme des débits journaliers à Fadougou (moyenne de 1954 à 2007).....	140
Figure 30 : Hydrogramme journalier de l'année du débit moyen le plus élevé à Fadougou (1954-2007).....	142
Figure 31 : Hydrogramme journalier de l'année du débit moyen le plus faible à Fadougou (1954-2007).....	143
Figure 32 : Evolution mensuelle des débits moyens à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	146
Figure 33 : Distribution statistique des débits moyens annuels de la Falémé à Gourbassi et Kidira (1954-2008)	147
Figure 34 : Evolution des débits moyens annuels à Gourbassi et Kidira (1954-2008)	147
Figure 35 : Hydraulicité en % aux stations de Gourbassi et Kidira (1954-2008)	148
Figure 36 : Hydrogrammes des débits journaliers moyens à Gourbassi et Kidira (1954-2008)	149
Figure 37 : Hydrogrammes journaliers de l'année du débit moyen le plus élevé à Gourbassi et Kidira (1954-2008)	150
Figure 38 : Hydrogramme journalier de l'année du débit moyen le plus faible à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	151
Figure 39 : Evolution des DMAX à Fadougou (1954-2007), Gourbassi et Kidira (1954-2008)	153
Figure 40 : Evolution de la crue à Fadougou (1954-2007).....	154
Figure 41 : Exemples de relations entre module, DCC, DMM et DMAX à Fadougou (1954-2007)	155
Figure 42 : Evolution comparée des DMAX et DCC à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	159
Figure 43 : Exemples de relations entre modules annuels, DCC, DMM et DMAX à Gourbassi et Kidira (1954-2008)	160
Figure 44 : Evolution des débits minimaux à Fadougou (1954-2007).....	163
Figure 45 : Exemples de relations entre modules annuels, DCE, DMM, DC11 et DMIN à Fadougou (1954-2007).....	164
Figure 46 : Evolution des débits minimaux à Gourbassi et Kidira (1954-2008)	166
Figure 47 : Exemples de relations entre modules annuels, DCE, DMM, DC11 et DMIN à Gourbassi et Kidira (1954-2008)	167
Figure 48 : Courbe de tarissement à Fadougou en année moyenne	171
Figure 49 : Courbe de tarissement en années extrêmes à Fadougou : (1) l'année du débit moyen le plus élevé 1958-59 ; (2) l'année du débit moyen le plus faible 1984-85.....	172
Figure 50 : Evolution du tarissement moyen à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	174
Figure 51 : Courbe de tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	175
Figure 52 : Courbe de tarissement de l'année du débit moyen le plus faible 1983-94 à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	176
Figure 53 : Volumes d'eau moyens annuels et mensuels écoulés dans le bassin de la Falémé	179
Figure 54 : Evolution annuelle de la lame d'eau écoulée et du volume à Fadougou (1954-2007)	181
Figure 55 : Evolution annuelle de la lame d'eau écoulée et du volume à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	184

Figure 56 : Evolution des précipitations à Kédougou de 1980 à 2008 : (a) Test de rupture de Pettitt ; (b) Indice d'anomalie pluviométrique de Lamb (PS : Période Sèche et PH : Période Humide)	192
Figure 57 : Hydrogrammes observés et simulés en phase de calage par le modèle GR2M (1981-1994)	194
Figure 58 : Hydrogrammes observés et simulés en phase de validation par le modèle GR2M (1995-2008)	196
Figure 59 : Corrélation entre débits observés et débits simulés en calage et en validation par GR2M aux stations de Fadougou (a ₁ : calage; a ₂ : validation), Gourbassi (b ₁ : calage; b ₂ : validation) et Kidira (c ₁ : calage; c ₂ : validation).....	197
Figure 60 : Hydrogrammes observés et simulés en calage et validation à Fadougou (1986 ; 1992 ; 1998 ; 2000), Gourbassi (1986 ; 1991 ; 1997 ; 2002) et Kidira (1986 ; 1994 ; 1997 ; 2006).....	199
Figure 61 : Evolution des incertitudes aux stations de Fadougou (a : calage ; b : validation), Gourbassi (c : calage ; d : validation) et Kidira (e : calage ; f : validation).....	201
Figure 62 : Appartenance ethnique des personnes interrogées (Source: Résultats d'enquêtes).....	206
Figure 63: Différents usages des eaux de la nappe dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes).....	220
Figure 64 : Types d'élevage utilisés et taille du troupeau (Source: Résultats d'enquêtes)	227
Figure 65 : Actions directes des usages sur les ressources en eau et relations entre usages dans le bassin de la Falémé (inspirée de Charnay B, 2010)	235
Figure 66 : Schématisation des sous-systèmes « Tronçons de cours d'eau » et « Nappes » (inspirée de Christian F., 2008)	247
Figure 67: Schématisation du fonctionnement de l'hydrosystème de la Falémé (inspirée de Christian F., 2008)	248
Figure 68 : Composantes du système « gestion de l'eau » d'un bassin : a) Vision thématique de la GIRE (d'après Le Goulven <i>et al.</i> , 1999) ; b) Indicateurs physiques du système « gestion de l'eau » (Charnay B., 2010).....	250
Figure 69 : Sous-système « ressources en eau » et ses paramètres dans le bassin de la Falémé (adaptée de Charnay B., 2010)	250
Figure 70 : Différents types d'usages de l'eau du bassin de la Falémé.....	251
Figure 71 : Types d'acteurs et variantes de modes d'organisation de la gestion de l'eau du bassin de la Falémé	252

Annexes

Figure 72 : Ajustement statistique des pluies annuelles aux stations du bassin (1951-2008)	286
Figure 73 : Variabilité annuelle des précipitations à la station de Labé, Tambacounda, Bakel et Kidira	286

LISTE DES TABLEAUX DANS LE TEXTE

Tableau 1: Caractéristiques des stations pluviométriques dans le bassin de la Falémé	36
Tableau 2 : Echantillonnage (Source: Résultats d'enquêtes).....	40
Tableau 3 : Coefficients de détermination <i>via</i> le double cumul entre stations pluviométriques	45
Tableau 4: Synthèse par sous bassin par rapport aux stations concernées dans le bassin de la Falémé.....	47
Tableau 5 : Présentation des sous-bassins de la Falémé et de leur contribution (Source Sow A.A., 2007).....	59
Tableau 6 : Paramètres morphométriques du bassin versant de la Falémé (Rochette, 1974)	69
Tableau 7 : Répartition hypsométrique dans le bassin versant de la Falémé (Source : srtm.csi.cgiar.org).....	70
Tableau 8: Valeurs propres, pourcentage et cumul	74
Tableau 9: Matrice de corrélations entre les variables	75
Tableau 10: Corrélations entre les variables et les axes principaux.....	75
Tableau 11 : Hydrogéologie du bassin de la Falémé d'après Marvier L. (1952) ; Dubreuil P. et Guiscafre R. (1971) et Sow A .A. (1984), cités par Dione, O. (1996)	78
Tableau 12 : Typologie des sols présents dans le bassin de la Falémé (Source Sow A.A, 2007).....	81
Tableau 13 : Poids volumique des éléments constitutifs du sol (Tropica Environnemental Consultants, 2008)	83
Tableau 14 : Typologie de la végétation présente dans le bassin de la Falémé (Source AGEFORE, 2004)	84
Tableau 15 : Situation des domaines climatiques au Sénégal et de leurs caractéristiques	92
Tableau 16 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Labé 11°19'N 12°18'O, altitude 1025 m de 1933 à 2004	94
Tableau 17 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Tougué : 11°26'N 11°40'O altitude 868m de 1922 à 2000	95
Tableau 18 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Mali 12°08'N 12°18'O Altitude 1464m de 1922 à 2000.....	95
Tableau 19 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kédougou 12°34' N 12°13'O Altitude 178m de 1950 à 2008.....	96
Tableau 20 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Saraya 12°47' 11°47' Altitude 396m de 1950 à 2000	97
Tableau 21 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Fongolimbi 12°25 12°01 Altitude 396m de 1963 à 2006	98
Tableau 22. Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kéniéba 12°48 N 11°21 O Altitude 136 m de 1950 à 2002.....	98
Tableau 23 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Tambacounda 13°43 N 13°41 O Altitude 49 m de 1950 à 2007	99
Tableau 24 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Bakel 14°54 N 12°28 O Altitude 25 m de 1950 à 2008.....	100
Tableau 25 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kidira 14°28 N 12°13 O Altitude 35 m de 1950 à 2008.....	100
Tableau 26 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Gourbassi 13°24 N 11°28 O Altitude 79 m de 1960 à 2008.....	100
Tableau 27 : Caractéristiques de la pluie moyenne en mm à Kayes 14°26 N 11°36 O Altitude 46 m de 1950 à 2008.....	101
Tableau 28: Fréquence d'apparition du maximum pluviométrique, des débuts et des fins de saison pluviométrique en %	101
Tableau 29 : Variabilité des précipitations dans les différents régimes pluviométriques du bassin	103
Tableau 30 : Résultats des tests de rupture (1950-2004)	106
Tableau 31 : Déficit pluviométriques des stations du bassin suivant le Test de Pettitt (1951-2004)	107
Tableau 32 : Résultats des tests de rupture (1923-2004)	107
Tableau 33 : Pluies annuelles fréquentielles pour les principales stations du bassin (1951-2008).....	109

Tableau 34 : Pluie moyenne aux sous bassins de Fadougou, Gourbassi et Kidira.....	111
Tableau 35 : Fréquences et directions des vents aux stations de Labé, Kédougou et Tambacounda.....	112
Tableau 36: Variation mensuelle de la vitesse du vent en m/s (1970-2000).....	116
Tableau 37 : Valeurs d'insolation moyennes mensuelles à Labé (1971-2004) Kédougou (1967-2004), Tambacounda (1967-2004) et Bakel (1984-2004).....	117
Tableau 38: Données de température à Kédougou, Labé et Tambacounda.....	117
Tableau 39 : Evaporation moyenne mensuelle à Labé (1970-2000) à Kédougou (1965-2007), à Tambacounda (1951-2007) et Bakel (1981-1997).....	119
Tableau 40 : Humidité relative mensuelle à Labé (1970-2000), Kédougou (1968-2007), Tambacounda (1951-2007) et Bakel (1983-2004).....	120
Tableau 41: Types de roches et leurs caractéristiques de perméabilité dans le bassin de la Falémé (Dione O., 1991).....	127
Tableau 42 : Bilan mensuel de l'eau par domaine climatique dans le bassin.....	131
Tableau 43 : Périodes de hautes et de basses eaux en fonction du coefficient mensuel de débits aux stations du bassin	136
Tableau 44 : Evolution mensuelle des débits et coefficients mensuels de débits à Fadougou (1954-2007).....	137
Tableau 45 : Valeurs caractéristiques de la variabilité des modules annuels à la station de Fadougou (1954-2007).....	138
Tableau 46 : Modules récurrentiels de la Falémé à Fadougou (1954-2007).....	139
Tableau 47 : Indicateurs statistiques des débits journaliers à Fadougou (1954-2007).....	140
Tableau 48 : Débits caractéristiques classées à Fadougou (1954-2007).....	141
Tableau 49 : Evolution mensuelle des débits et coefficients mensuels de débits à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	143
Tableau 50 : Valeurs caractéristiques de la variabilité des modules annuels aux stations de Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	146
Tableau 51 : Modules récurrentiels de la Falémé à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	147
Tableau 52 : Indicateurs statistiques usuels des débits journaliers à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	148
Tableau 53 : Débits caractéristiques classées à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	149
Tableau 54: Caractéristiques de la crue aux années hydrologiques particulières à Fadougou 1954-2007).....	153
Tableau 55 : Fréquences des dates d'apparition du DMAX de 1954 à 2007 à Fadougou.....	154
Tableau 56 : Caractéristiques des crues à Fadougou (1954-2007).....	155
Tableau 57 : Ecoulement et pluviométrie mensuels de l'année du débit moyen annuel le plus élevé à Fadougou (1954-2007).....	156
Tableau 58 : Evolution mensuelle des débits et de la pluie de l'année du débit moyen annuel le plus faible à Fadougou (1954-2007).....	156
Tableau 59: Caractéristiques des années hydrologiques particulières à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	157
Tableau 60 : Nombre et fréquences des dates d'apparition du DMAX de Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	158
Tableau 61 : Caractéristiques des crues à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	159
Tableau 62 : Evolution mensuelle des débits et de la pluie de l'année du débit moyen annuel le plus élevé à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	161
Tableau 63 : Evolution mensuelle des débits et de la pluie de l'année du débit moyen annuel le plus faible à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	162
Tableau 64 : Nombre et fréquences des dates d'apparitions du DMIN de 1954 à 2007 à Fadougou.....	163
Tableau 65 : Caractéristique des étiages à Fadougou (1954-2007).....	163
Tableau 66 : Nombre et fréquences des dates d'apparitions du DMIN à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	165
Tableau 67 : Caractéristique des étiages à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	166
Tableau 68 : Evolution de la pluviométrie et de l'écoulement dans le bassin de la Falémé.....	168
Tableau 69 : Nombre et fréquences des dates de début (Q_0) et de fin (Q_t) du tarissement à Fadougou.....	170
Tableau 70 : Caractéristique du tarissement moyen à Fadougou (1954-2007).....	170
Tableau 71 : Valeurs caractéristiques du tarissement en années extrêmes à Fadougou (1954-2007).....	171
Tableau 72 : Valeurs caractéristiques du tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé à Fadougou.....	171
Tableau 73 : Nombre et fréquences des dates de début (Q_0) et de fin (Q_t) du tarissement à Gourbassi.....	173
Tableau 74 : Nombre et fréquences des dates de début (Q_0) et de fin (Q_t) du tarissement à Kidira.....	173
Tableau 75 : Caractéristique du tarissement moyen à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	174
Tableau 76 : Valeurs caractéristiques du tarissement en années extrêmes à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	175
Tableau 77 : Valeurs caractéristiques des deux tarissements de l'année du débit moyen le plus faible à Kidira (1954-2008).....	176
Tableau 78 : Caractéristiques du bilan moyen annuel à Fadougou (1954-2007).....	180
Tableau 79 : Caractéristiques du bilan en années extrêmes à Fadougou (1954-2007).....	182
Tableau 80 : Caractéristiques du bilan annuel à Gourbassi et Kidira (1954-2008).....	183
Tableau 81 : Caractéristiques du bilan en années extrêmes à Gourbassi et Kidira (1954-2007).....	185
Tableau 82: Nombre de pluviomètres nécessaires pour une description acceptable de la pluie de bassin en fonction de la surface du bassin (Schaake (2000) d'après Oudin (2004)).....	188
Tableau 83: Stations utilisées pour déterminer la pluie moyenne des sous-bassins de la Falémé.....	190
Tableau 84 : Caractéristiques des stations hydrologiques et données de FAO Smax sur le bassin de la Falémé (Source SIEM/hydro sciences).....	190
Tableau 85: Résultats des calages (1981-1994) et des validations (1995-2008) du modèle GR2M.....	193
Tableau 86: Débits moyens observés et simulés (mm) par le modèle GR2M.....	197
Tableau 87: Corrélation entre débits observés et simulés en calage et validation.....	198

Tableau 88: Synthèse des performances en calage (1981-1994 et 1995-2008) et en validation (1981-1994 et 1995-2008) du modèle GR2M	199
Tableau 89: Performances moyennes et critère de robustesse du modèle GR2M (1981-2008).....	200
Tableau 90: Incertitudes moyennes en phases de calage et de validation dans le bassin de la Falémé	200
Tableau 91: Paramètres X1 et X2 du modèle GR2M	202
Tableau 92 : Evolution de la population totale entre 1988, 2002 et 2005 (ANSD, 2006)	210
Tableau 93 : Taille de la population masculine et féminine dans le bassin de la Falémé (ANSD, 2008).....	211
Tableau 94 : Répartition de la population des deux régions par groupe ethnique (RGPH.II).....	212
Tableau 95 : Structure de la population par grands groupes d'âges et par sexe de la région de Tambacounda.....	212
Tableau 96 : Taux de mortalité	213
Tableau 97 : Quelques caractéristiques des eaux de pluie dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)	215
Tableau 98 : Usages de l'eau de surface dans le bassin versant de la Falémé (Source: Résultats d'enquêtes)	217
Tableau 99: Usages de l'eau de la Falémé dans des villages explorés (Source: Résultats d'enquêtes)	218
Tableau 100 : Puits et forages forés dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes).....	219
Tableau 101 : Autres caractéristiques des eaux souterraines (Source: Résultats d'enquêtes).....	219
Tableau 102 : Equipements hydrauliques des communautés rurales dans le département de Saraya	221
Tableau 103 : Relations entre types de ressources en eau et usages sectoriels de l'eau (Source: Résultats d'enquêtes)	222
Tableau 104: Caractéristiques de l'agriculture pluviale (Source: Résultats d'enquêtes)	224
Tableau 105: Principales spéculations du terroir (maraîchage) (Source: Résultats d'enquêtes).....	225
Tableau 106 : Système de culture (Source: Résultats d'enquêtes).....	226
Tableau 107: Rôle de la Falémé dans l'abreuvement du bétail (Source: Résultats d'enquêtes)	228
Tableau 108: Sociétés et titres miniers dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé (Service Régional des Mines, 2005).....	230
Tableau 109 : Actions sur les ressources en eau, niveaux de satisfaction et contraintes principales des usages de l'eau	236
Tableau 110 : Problèmes majeurs de la gestion de l'eau au Sénégal (Source : DGPRE, 2007)	242
Tableau 111 : Récapitulatif de quelques dispositions de l'OMVS applicables à la Falémé, à l'utilisation de ses eaux et à sa gestion (Source : Convention et Charte du bassin du fleuve Sénégal).....	244
Tableau 112 : Découpage en unités du fonctionnement hydrologique du bassin de la Falémé	247
Tableau 113 : Acteurs du secteur de l'eau du Sénégal pouvant intervenir au bassin de la Falémé	253
Tableau 114 : Différentes causes de la dégradation des ressources en eau dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)	255
Tableau 115 : Différentes causes de contraintes liés aux activités de production dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain).....	256
Tableau 116 : Hypothèses de solutions aux problèmes de dégradation des ressources en eau dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)	258
Tableau 117 : Hypothèses de solutions aux problèmes d'ordre socio-économique du bassin de la Falémé en fonction des villages interrogés (Source : Résultats d'enquêtes)	259
Tableau 118 : Synthèse de l'analyse évaluative d'enjeux liés à l'eau dans le bassin de la Falémé (source SDAGE, 2009)	260

Annexes

Tableau 119 : Echantillonnage des villages interrogés	285
Tableau 120 : Valeurs des débits décennaux, vicennaux et centennaux en période sèches et humides de 1954 à 2008	287
Tableau 121 : Résultats fournis par GR2M aux périodes de calage 1981-1994 et 1995-2008 par optimisation du Nash (ln(Q)) et Nash(Q) : effet de la période sur le calage.....	288
Tableau 122 : Résultats fournis par GR2M aux périodes de calage 1981-1994 et 1995-2008 par optimisation du Nash (Q) : effet de la période sur le calage	289
Tableau 123: Noms de quelques ASC présents dans la zone (Source: Résultats d'enquêtes).....	290
Tableau 124 : Proportion de la population ayant accès aux services sociaux ciblés et indice d'accès global selon la communauté rurale dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé	291
Tableau 125: Espèces ligneuses appréciées par le cheptel.....	294
Tableau 126: Calendrier annuel d'activités des populations (Source: Résultats d'enquêtes)	294
Tableau 127 : Synthèse des espèces utilisées et des types d'utilisation dans les villages visités (Source: Résultats d'enquêtes).....	295
Tableau 128 : Caractérisations des sols dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)	296
Tableau 129 : Autres caractéristiques des sols dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)	296
Tableau 130 : Synthèse des espèces animales dans les villages (Source : service des eaux et forêts et enquêtes)	296
Tableau 131: Réserves de gisement de fer (Source : Service Régional de l'Energie, des Mines et de l'Industrie (SREMI) de Tambacounda)	296
Tableau 132: Gisements d'or de la région de Kédougou (Source : SREMI – Tambacounda).....	297
Tableau 133: Gisements de marbre de la région de Kédougou (Source : SREMI – Tambacounda)	297
Tableau 134: Caractéristiques de l'orpaillage dans le bassin (Source : Résultats d'enquêtes)	297
Tableau 135: Activités commerciales et mode d'utilisation des ressources dans le bassin de la Falémé (Source: Résultats d'enquêtes).....	297
Tableau 136 : Types de feux de brousse dans le bassin de la Falémé (Source : Mbow C, 2004 et Résultats d'enquêtes) ...	297
Tableau 137 : Matrice d'évolution des différentes ressources dans la zone d'étude (Source : Touré B., 2002 et Résultats d'enquêtes).....	297

Tableau 138 : Différentes causes de dégradation des ressources pédologiques et biologiques dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)	298
Tableau 139 : Hypothèses de solutions aux problèmes de dégradation des ressources pédologiques et biologiques dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)	298
Tableau 140 : Plan Directeur de l'Eau du bassin de la Falémé (enjeux, orientation, objectifs et indicateurs)	302
Tableau 141 : Méthodes de calcul et estimations du DOE dans le bassin de la Falémé (Source : Fabien Christian, 2008)	303
Tableau 142 : Solutions aux problèmes de gestion des eaux au Sénégal (Source : DGPRE, 2007)	303
Tableau 143 : Résultats des analyses chimiques des eaux de surface et souterraines (Source : Tropica Environnemental Consultants, 2008)	304

LISTE DES CARTES DANS LE TEXTE

Carte 1 : Situation géographique du bassin versant de la Falémé, du fleuve Sénégal et des Républiques du Sénégal, du Mali et de la Guinée	9
Carte 2 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Falémé	10
Carte 3 : Réseau pluviométrique et stations hydrométriques du bassin versant de la Falémé	37
Carte 4 : Situation géographique du sous-bassin de la Falémé dans le bassin versant du fleuve Sénégal	58
Carte 5 : Réseau hydrographique et répartition de la superficie du bassin versant de la Falémé par pays (Sénégal, Mali et Guinée Conakry).....	60
Carte 6 : Façonnement de la boutonnière Kédougou-Kéniéba dans le bassin de la Falémé	63
Carte 7 : Esquisse géologique du bassin versant de la Falémé (Source Sow A .A. 2007)	65
Carte 8 : Relief du bassin versant de la Falémé (Source Orange, 1992).....	72
Carte 9 : Modèle Numérique d'Altitude du bassin versant de la Falémé.....	73
Carte 10 : Esquisse hydrogéologique du bassin versant de la Falémé (Source L. Marvier., 1952 ; P Dubreuil et R. Guiscafre, 1971 et A .A. Sow, 1984 cités par Dione, O., 1996)	79
Carte 11 : Esquisse morpho-pédologique du bassin versant de la Falémé (Source Sow A .A. 2007)	82
Carte 12 : Esquisse des paysages végétaux dans le bassin versant de la Falémé (Source Sow A .A. 2007).....	85
Carte 13 : Dynamique de la circulation atmosphérique en Afrique (M. Leroux, 1980, 1992, 1993).....	88
Carte 14: Position moyenne de la trace au sol de l'Equateur météorologique dans sa structure FIT (Leroux M. 1980).....	89
Carte 15 : Migration de la trace au sol de l'Equateur météorologique en Afrique Occidentale (Leroux M., 1980).....	90
Carte 16 : Domaines climatiques du bassin versant de la Falémé	93
Carte 17: Polygones de Thiessen appliqués au bassin versant de la Falémé	110
Carte 18: Situation des isohyètes dans le bassin versant de la Falémé	123
Carte 19 : Synthèse des facteurs physiques de l'écoulement dans le bassin versant de la Falémé	132
Carte 20 : Régime fluvial tropical de transition du bassin de la Falémé à la station de Fadougou	137
Carte 21 : Régime fluvial tropical pur du bassin de la Falémé aux stations de Gourbassi et Kidira.....	144
Carte 22: Sous-bassins contrôlés par les stations hydrométriques et polygones de Thiessen appliqués au bassin de la Falémé	189
Carte 23 : Villages d'enquêtes dans les zones de Kidira et de Saraya	207
Carte 24 : Régions et Communautés rurales de la partie sénégalaise du bassin versant de la Falémé.....	209
Carte 25 : Caractérisation des usages de l'eau de la Falémé dans la partie sénégalaise du bassin	216
Carte 26 : Espace agricole et types d'eau utilisée à Lalli (CR de Gathiary) et Sitabanta (CR de Sinthiou Fissa)	223
Carte 27 : Potentiel minier et permis d'exploitation dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé.....	232

Annexes

Carte 28 : Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique moyen (RUSA de Wishmeier) dans le bassin de la Falémé (Source : Rose, 1977).....	287
Carte 29 : Typologies des infrastructures sanitaires dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé	290
Carte 30 : Espace virtuelle devant être conservé contre la coupe abusive de la transhumance	299
Carte 31 : Situation et nationalités présentes sur le placier d'or Nyafa dans le village Dyabougou : la taille des flèches est proportionnelle aux nombre de personnes présentes sur le site.	300

LISTE DES PHOTOS DANS LE TEXTE

Photo 1 : Usages domestiques de l'eau de la Falémé (cliché de Faye C, avril et décembre 2010)	218
Photo 2 : Adduction d'eau potable (AEP) dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)	220
Photo 3 : Agriculture dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009).....	224
Photo 4 : Elevage dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2010).....	227
Photo 5 : Activité de pêche dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)	229
Photo 6 : Orpaillage dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, décembre 2010 et avril 2011).....	231

Annexes

Photo 7 : Structure de l'habitant dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, avril 2010 et avril 2011).....	305
Photo 8 : Catégories de sols dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009)	305
Photo 9 : Dégradation de l'environnement dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)	305
Photo 10 : Stations hydrométriques dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et décembre 2010)	305
Photo 11 : Moyens de transport dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)	305

ANNEXES

- ANNEXE 1 : QUESTIONNAIRE ET GUIDE D'ENTRETIEN
- ANNEXE 2 : METHODE D'ECHANTILLONNAGE UTILISEE
- ANNEXE 3 : DONNEES SUR LES PLUIES ET LES DEBITS
- ANNEXE 4 : DONNEES SUR LA MODELISATION : L'EFFET DE LA PERIODE SUR LE CALAGE
- ANNEXE 5 : DONNEES SUR LE MILIEU ET LES HOMMES
- ANNEXE 6 : DONNEES SUR LES RESSOURCES NATURELLES ET L'ECONOMIE RURALE
- ANNEXE 7 : DONNEES SUR LE PLACER D'OR « NYAFA » DANS LE VILLAGE DE DYABOUGOU
- ANNEXE 8 : DONNEES SUR LA GESTION DE L'EAU : LE PLAN DIRECTEUR DE L'EAU DU BASSIN
- ANNEXE 9 : DONNEES SUR LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN DE LA FALEME
- ANNEXE 10 : ANNEXES PHOTOGRAPHIQUES DU BASSIN DE LA FALEME

Annexe 1 : Questionnaire et Guide d'entretien

➤ Questionnaire

I – Localisation et identification du chef de ménage

Nom du village

-chef de ménage : M F

-Ethnie : Malinké Peul Bedik

Sarakholé autres :

-Situation matrimoniale : M C D

-Nombre d'épouses

-Religion : musulmane chrétienne animiste

II Organisation de l'espace

1 Le Foncier

-Avait-il des problèmes fonciers avant le déficit pluviométrique ? Oui non

-Si oui pourquoi?

Rareté de l'eau Occupation de la végétation

Cuirassement Erosion

-La gestion foncière : A qui appartiennent les terres de cultures? CR Famille Domaine national

-Y a-t-il des conflits liés à la gestion des terres?

Oui Non

-Quels sont les modes d'acquisitions des terres ?

Location Défrichage Autres

-Les femmes ont-elles des terres ?

Oui Non

-Quelle est la superficie de champs que vous cultivez ?

Mois 5ha 5 à 10ha plus 10ha

Impact sur le plan socio-économique

2 L'agriculture

- Quels types de cultures pratiquez-vous ?

Sous pluie Agriculture de décrue Maraichage

Autres

-Les rendements ont-ils augmentés actuellement ?

Oui Non

-Quelles sont les principales spéculations du terroir?

Mil mais coton arachide autres

-Quelles sont les principales cultures maraîchères du terroir?

Patate Pomme de terre Pastèque

Piment Tomates Autres

-La superficie cultivée dans votre champ a-t-elle diminué ?

Oui Non

-Si oui pourquoi ?

Cuirassement Manque de main d'œuvre

Salinisation Végétation

Insuffisance d'eau Manque de fertilité

-Actuellement, comment sont les rendements ?

Peu importants Importants Très importants

-Quels sont les systèmes de culture

Système extensif Système intensif

- Quels sont les rendements par spéculation à l'hectare

Moins de 2 ha 2 ha 4ha Plus de 4 ha

-Pratiquez-vous la jachère ? Oui Non

Amendez- vous les champs Oui Non

-Les périodes au cours desquelles se développent les activités.

Saison pluvieuse Saison non pluvieuse

Thème	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Agriculture				

3 L'élevage

-Quel élevage pratiquez-vous ?

Ovins Bovins Caprins Autres

-Quelle est la taille de votre troupeau ?

Moins de 50 50 100 Plus de 100

-Comment est le rôle de la Falémé sur l'abreuvement du bétail

Moindre Important Très important

- Quelles sont les zones d'abreuvement

La Falémé Autre rivière

-Quelles sont les contraintes liées à l'élevage ?

Exploitation Défense Gestion

- Quelles sont les solutions aux contraintes de l'élevage ?

Exploitation Défense Gestion

Thème	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Elevage				

4 L'exploitation forestière

- Quelles sont les espèces exploitées ?

Arbres Arbustes Herbes

-Quelles sont les espèces disparues.....

- Quelles sont les modalités d'exploitation ?

Avec permis Sans permis

-Quelle est la destination des produits ? Local Villes

- Quelles sont les contraintes et les solutions préconisées

Exploitation Défense Gestion

Thème	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Exploitation forestière				

5 Le commerce

- Quels sont les principaux produits commercialisés ?

Agricoles **Animaux** **Autres**

- Quels sont les lieux d'approvisionnements et d'écoulements ?

Marchés **Centres urbains** **Villages**

- Quels sont les problèmes liés aux échanges commerciaux ?

Exploitation **Défense** **Gestion**

- Quelles sont les solutions aux problèmes que vous proposez ?

Thème	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Commerce				

6 La pêche : La pisciculture

- Quelles sont les différentes spéculations ?.....

- Quels sont les différents intervenants ?.....

- Comment est le rôle de la Falémé par rapport à l'activité ?

Peu important **Important** **Très important**

- Quelles sont les contraintes liées à l'exploitation ?

Exploitation , **Défense**, **Gestion**

- Les solutions aux contraintes

Thème	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Pêche				

7 L'artisanat

- Quels sont les métiers exercés ?.....

- Comment sont les conditions de travail ?

Difficiles **Acceptables**

- Quelle est la destination des produits ?

Vente **Utilisation locale** **Exportation**

- Quelles sont les contraintes et les solutions préconisées ?

Exploitation **Gestion**

Thème	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Artisanat				

8 L'exploitation minière

- Indiquez le type de sol favorable ?

Cuirasse **Argile** **Talweg**

- Comment est le rôle de la Falémé pour l'exploitation ?

Peu important **Important** **Très important**

Comment est la surface exploitée ? **Petite** **Grande**

Comment sont les conséquences ? **Positives** **Négatives**

Quelles sont les contraintes liées à l'exploitation ?

Exploitation **Défense** **Gestion**

- Les solutions préconisées.....

Thème	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Exploitation minière				

III- La dynamique organisationnelle

- Quelle est la forme d'organisation dans le village ?

Maisons groupées **Maisons dispersées**

- Les différents groupements (**Jeunesse** **Femme**)

- Quels sont les différents projets et ONG de la localité

.....

- Quelles sont les structures associatives ?.....

- Quelles sont les structures administratives ?.....

- Comment est l'implication des autorités locales dans la gestion des ressources ? **Faible** **Moindre** **Importante**

- Quelles sont les contraintes liées à la gestion des localités

Enclavement **Pauvreté** **Analphabetisme**

IV_ Les ressources naturelles

1- Les ressources en eau

- Constatez-vous la diminution des pluies- quelles périodes :

Oui **Non**

- Le nombre de jour de pluies a-t-il diminué ?

Oui **Non**

- Comment est l'état passé et présent de l'évolution des pluies ?

Stabilité **Augmentation** **Diminution**

- Le début de la saison pluvieuse est-il précoce, tardif ou normal ? **Tardif** **Précoce** **Normal**

- L'abandon des champs est-il dû à la faiblesse de la pluie

Oui **Non**

- Introduisez-vous de nouvelles spéculations en raison de la diminution des pluies ? **Oui** **Non**

- Quelles sont les stratégies pour la diminution de la pluie ?

Irrigation **Nouvelle culture** **Réadaptation**

- Quelles sont les contraintes majeures à la diminution des pluies

Exploitation **Défense** **Gestion**

- Quelles solutions préconisez-vous face à la diminution des pluies ?

THEME	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Pluviométrie				

a- Les eaux souterraines

- Combien de forages et de puits vous disposez ?.....
- Quelle la profondeur des forages et des puits ?.....
- Comment est la qualité des eaux de forages et de pluies...
Bonne **Acceptable** **Moindre** **Mauvaise**
- Avez-vous constaté une diminution des eaux souterraines
Oui **Non**
- Avez-vous constaté une diminution des quantités d'eau tirées des forages, des puits- **Oui** **Non**
- Recreusez- vous les puits ? **Oui** **Non**
- Quelles sont les utilisations faites avec l'eau des nappes :

Bétail, Maraîchage, Usages domestiques

- Quelles sont les contraintes majeures pour ces types d'eau ?
Exploitation , **Défense** , **Gestion**
- Quelles solutions préconisez-vous ?

THEME	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Eaux souterraines				

b- Les eaux de surfaces

- Quels sont les écoulements pérennes **Falémé** **Rivière**
- Indiquez les écoulements saisonniers ?
.....
- Quelles sont les zones inondables ? **Cuvette** **Mares**
- Quelles utilisations faites-vous avec les eaux de surface ?
Boisson **C Maraîchage** **Bétail**
- Usages domestiques**

- Quelles sont les contraintes majeures pour ces types d'eau ?
Exploitation **Défense** **Gestion**
- Quelles sont les solutions préconisées pour ces types d'eau ?

THEME	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Eaux de surface				

2 -Les ressources pédologiques

- Donnez les types de sols présents dans le bassin ?
.....
- Donnez la répartition de ces types de sols en %.....
- La toposéquence : sur quoi se développe chaque type de sol ? **Plateau** **Plaine** **Bas-fonds** **Pente** **Zones inondées**
- Quel type de végétation pousse t-il sur ces types de sol ?
Forêt **Savane** **Steppes**
- Quelles sont les spéculations autorisées par ces types de sol ?
Mil **Mais** **Coton** **Arachide** **Autres**
- Comment sont les rendements sur chaque type de sol
Peu important **Important** **Très important**
- Quelles sont les exigences en travail, en intrant, en matériel pour chaque type de sol.....
- Quels sont les types de sol du plus important en superficie
.....

- Quels sont les sols qui ont les plus importants rendements
.....
- I Quelles les contraintes majeures liées à l'exploitation des types de sol ? **Exploitation** **Défense** **Gestion**
- Quelles solutions préconisez-vous ?

THEME	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs actions envisagées
TPOLOGIE DES SOLS				
Type1				
Type 2				
Type 3				
Type4				

-Classification préférentielle des types de sol

Rang	Avantages	Contraintes	Spéculations
1			
2			
3			

3- Les ressources végétales

- Comment est la végétation de la zone ? **Savane** **Steppe**
- Quelles sont les espèces les plus représentées ?
Arborées **Arbustives** **Herbacées**
- Donnez la liste des espèces les plus utilisées
.....
- Faites une classification préférentielle des espèces, niveau utilisé, type d'utilisation
- Y-a-t-il dégradation de la végétation ?
Oui **Non**

- Quelles sont les causes de la dégradation de la végétation
Anthropiques **naturels** **animales**

Ressources	Evolution		
	Passé	Présent	Futur

- Donnez le mode d'utilisation de la ressource

Meubles Cuisson Habitations Bois de vente

- Le mode de gestion de la ressource

Forêt classée Espèces protégées Clôtures

-Y-a-t-il des comités de défenses, de gestion, de restauration ?

-Pouvez-vous quantifier les prélèvements sur les ressources -?

Oui Non

-Donnez les contraintes majeures des ressources végétales

Exploitation Défense Gestion

- Quelles solutions aux contraintes sur les ressources végétales préconisez-vous ?.....

THEME	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
Ressources végétales				
Exploitation				
Gestion				
Défenses				
Autres				

4- La faune

-Quelles sont les espèces rencontrées dans la zone ?

Lion Phacochère Antilope Buffle Autres

- Quelles sont les espèces en voie de disparition ?

Lion Phacochère Antilope Buffle Autres

- Quelles sont les espèces disparues ?.....

La chasse est-elle pratiquée dans la zone ?

Oui Non

Si oui, quelles sont les espèces capturées ?.....

Est que la faune cause des dommages ?

Oui Non

- Quelles sont les stratégies pour la sauvegarde des espèces ?

Protection Surveillance Amendes

- Quels sont les problèmes majeurs en rapport avec la faune ?

Braconnage Déforestation Nourritures

- Quelles sont les solutions de ces problèmes ?

THEME	Contraintes	Solutions	Actions envisagées	Promoteurs de ces actions
La faune				

5 -Synthèse des contraintes et des potentialités des ressources

1 .Pyramide des contraintes

2 .Pyramide des solutions

3 .Tableau de priorisation des actions

4 Les solutions préconisées pour la gestion des ressources naturelles

➤ Guide d'entretien destiné à certains acteurs de la gestion de l'eau dans le bassin.

1. Quel est l'état de votre connaissance sur les ressources en eau du bassin ?
2. Recensez-vous des données quantitatives (débits) et qualitatives sur les ressources en eau ?
3. Comment évaluez-vous les actions de votre structure et son plan de gestion ?
4. Disposez-vous d'outils d'évaluation spécifiques ?
5. Quel est votre territoire d'action et de réflexion ?
6. Est-il pertinent pour une gestion intégrée ?
7. Connaissez-vous les différents usages et leurs actions dans le bassin ?
8. Prenez-vous en compte les impacts des usages dans le bassin ?
9. Avez-vous une fois recensé des données sur ces impacts (des usages) dans le bassin ?
10. Pouvez-vous déterminer les enjeux socioéconomiques des usages, leur importance et leur intégration dans le système du bassin ?
11. Quelles sont les différentes réglementations qui s'appliquent à chaque usage ?
12. Donnez l'application et le contrôle de ces différentes réglementations.
13. Entretenez-vous des rapports avec d'autres acteurs de l'eau du bassin ?
14. Combien de partenariats entretenez-vous avec ces acteurs ?
15. Entretenez-vous des rapports avec des usagers de l'eau du bassin ?
16. Combien de partenariats entretenez-vous avec des usagers de l'eau ?
17. Votre structure de gestion participe-t-elle ou a-t-elle mis en place un processus de concertation dans le bassin ?
18. Quel est le nombre d'actions de sensibilisation engagées par votre structure de gestion ?
19. Votre structure de gestion maîtrise-t-elle le foncier pour gérer son usage ?
20. Quelle est la part de la maîtrise foncière pour une gestion efficace ?
21. Quelles techniques sont utilisées par votre structure de gestion ?
22. Ces techniques lui permettent-elles de mettre en place une gestion intégrée ?
23. Indiquez le rôle institutionnel de votre structure : responsabilité, légitimité, compétences.
24. Votre structure de gestion est-elle implantée localement ou s'appuie-t-elle sur des relais locaux pour mener les actions de gestion ?
25. Qualifiez son mode de gestion et son aptitude à modifier ses pratiques pour tendre vers une gestion intégrée des ressources en eau.

Annexe 2 : Méthode d'échantillonnage utilisée

1. La méthode d'échantillonnage

La collecte des données sur la situation socioéconomique des habitants vivant dans le bassin versant a été faite suivant la méthode d'échantillonnage aléatoire. Le questionnaire a concerné 36 villages sur un total de 181 villages situés dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé, soit 1/5,8 des villages (sur 6 villages, un est choisi pour les enquêtes), ce qui correspond à un taux de sondage global de 19,9 %. 294 ménages sont interrogés sur 1179 pour l'ensemble des 36 villages riverains explorés, soit un taux de sondage global de 24,9 %. La liste des villages et la proportion des ménages interrogés sont données dans le **Tableau 119**.

Tableau 119 : Echantillonnage des villages interrogés

Nom du village	Longitude	Latitude	Nombre de ménages	Nombre de ménages interrogés	% de ménages interrogés	% de ménages interrogés sur les 294
Guita	799323	1591928	41	9	21,9	3,06
Sanankolé	806333	1591220	10	9	90	3,06
Débou Diaoubé	800948	1581712	2	2	100	0,68
Sénédebou	796977	1589089	115	9	7,83	3,06
Naye	801540	1595807	54	9	16,7	3,06
Gourel Bocar samba	795270	1586703	9	5	55,6	1,7
Arroundou	796597	1632755	122	9	7,38	3,06
Marsa	792617	1629723	73	9	12,3	3,06
Soukounkou	836312	1481960	30	9	30	3,06
Dyabougou	838319	1486778	38	9	23,7	3,06
Soréto	834706	1493603	45	9	20	3,06
Niéniéko	827078	1499826	31	9	29	3,06
Sékhoto	824468	1503640	12	9	75	3,06
Kaourou	820052	1507454	10	9	90	3,06
Dyala Bakary	820253	1509862	14	5	35,7	1,7
Moussala	818044	1515684	29	9	31	3,06
Laminia	820944	1506548	39	9	23,1	3,06
Elimalo	822794	1504903	31	9	29	3,06
Moussala Mahinamine	890467	1431898	21	10	47,6	3,4
Madina	891316	1423012	8	8	100	2,72
Kolya	889716	1438825	20	9	45	3,06
Faranding	886290	1445542	20	9	45	3,06
Sansamba	888682	1442062	42	15	35,7	5,1
Dialadakhoto	887585	1424007	-	5	-	1,7
Kharakhénia	882330	1421697	10	9	90	3,06
Saraya	862322	1415470	133	9	6,77	3,06
Saeinsoutou	863641	1482592	60	14	23,3	4,76
Wortokhaty	855707	1483835	17	9	52,9	3,06
Toumbirara	851336	1479993	4	4	100	1,36
Dalaba	851336	1476700	-	5	-	1,7
Sékhoto	847524	1473581	20	10	50	3,4
Dambala	852549	1470981	25	9	36	3,06
Bokhody	853589	1466129	13	9	69	3,06
Daloto	857575	1460583	81	9	11,1	3,06
Gourbassi	863468	1483806	-	2	-	0,68
Farinkounda	855428	1483806	-	2	-	0,68
Total	-	-	1179	294	25,9	100

Annexe 3 : Données sur les pluies et les débits

➤ Analyse des pluies

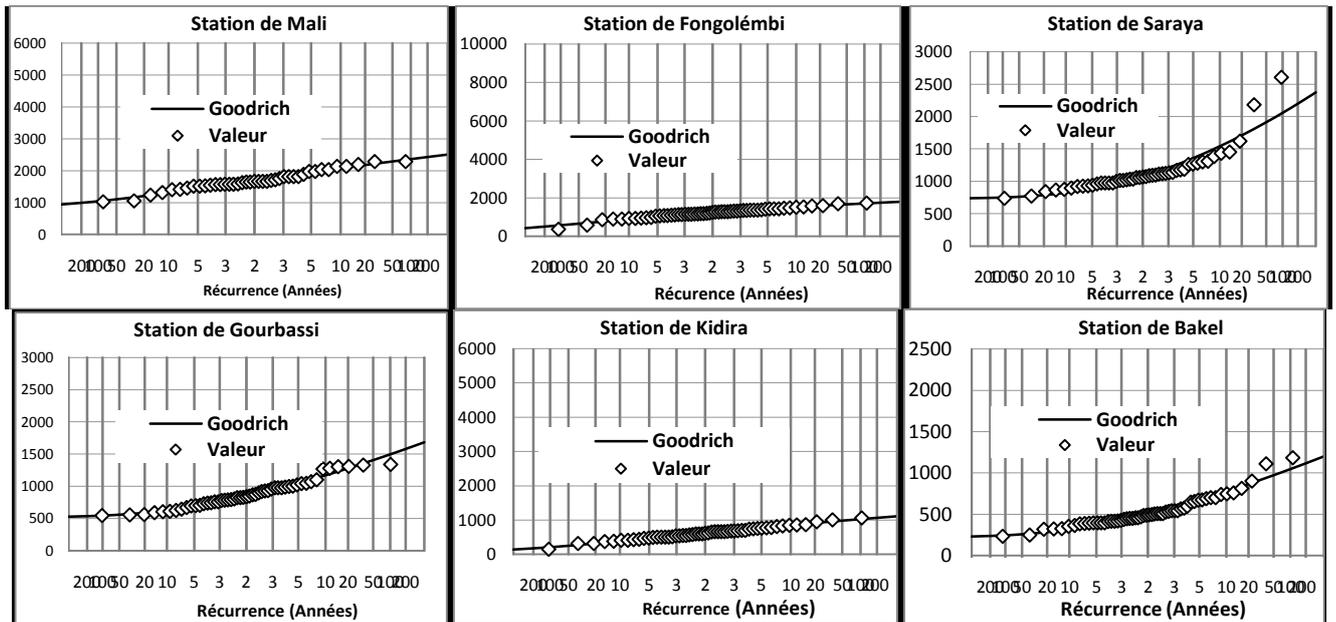


Figure 72 : Ajustement statistique des pluies annuelles aux stations du bassin (1951-2008)

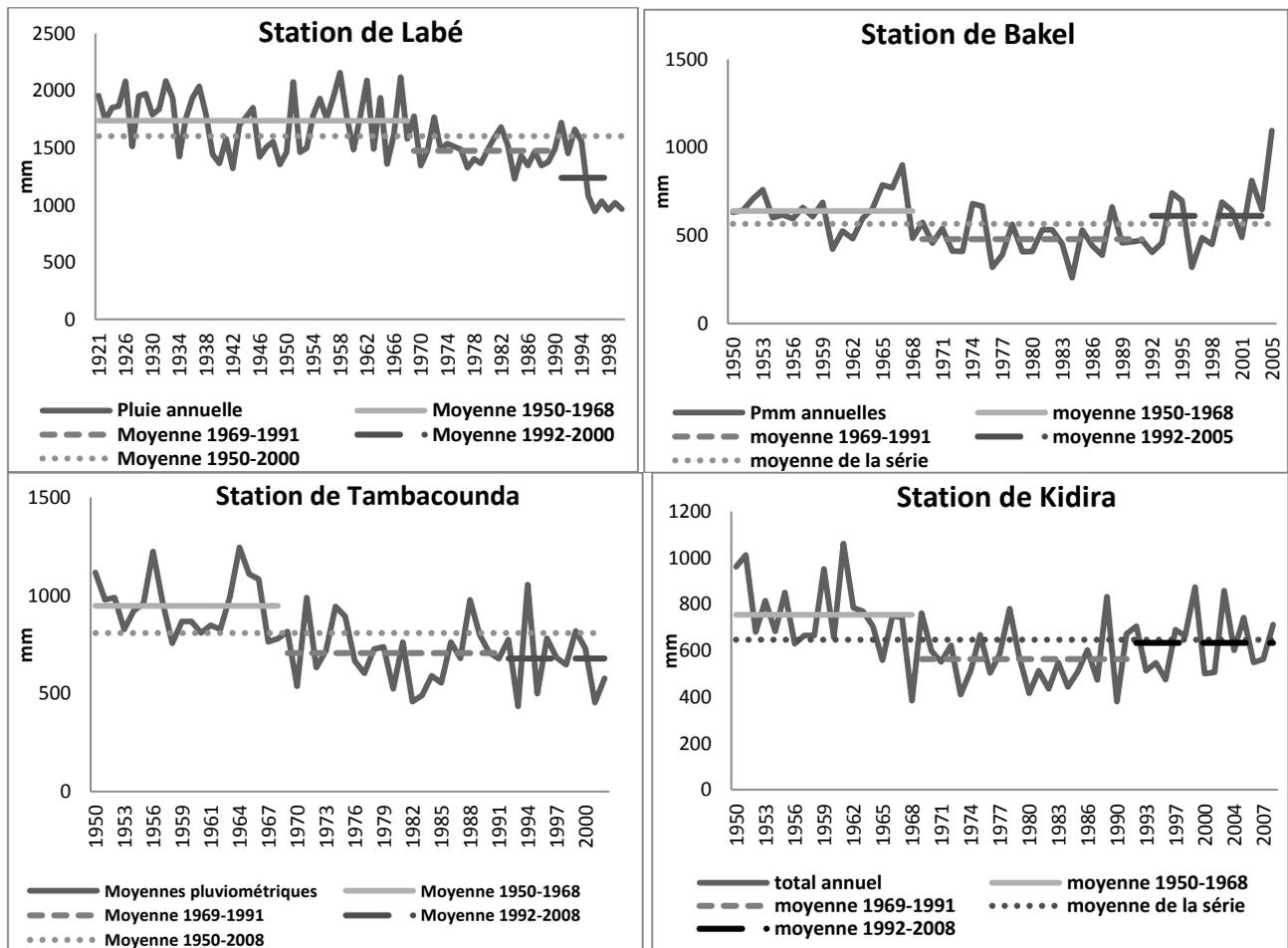
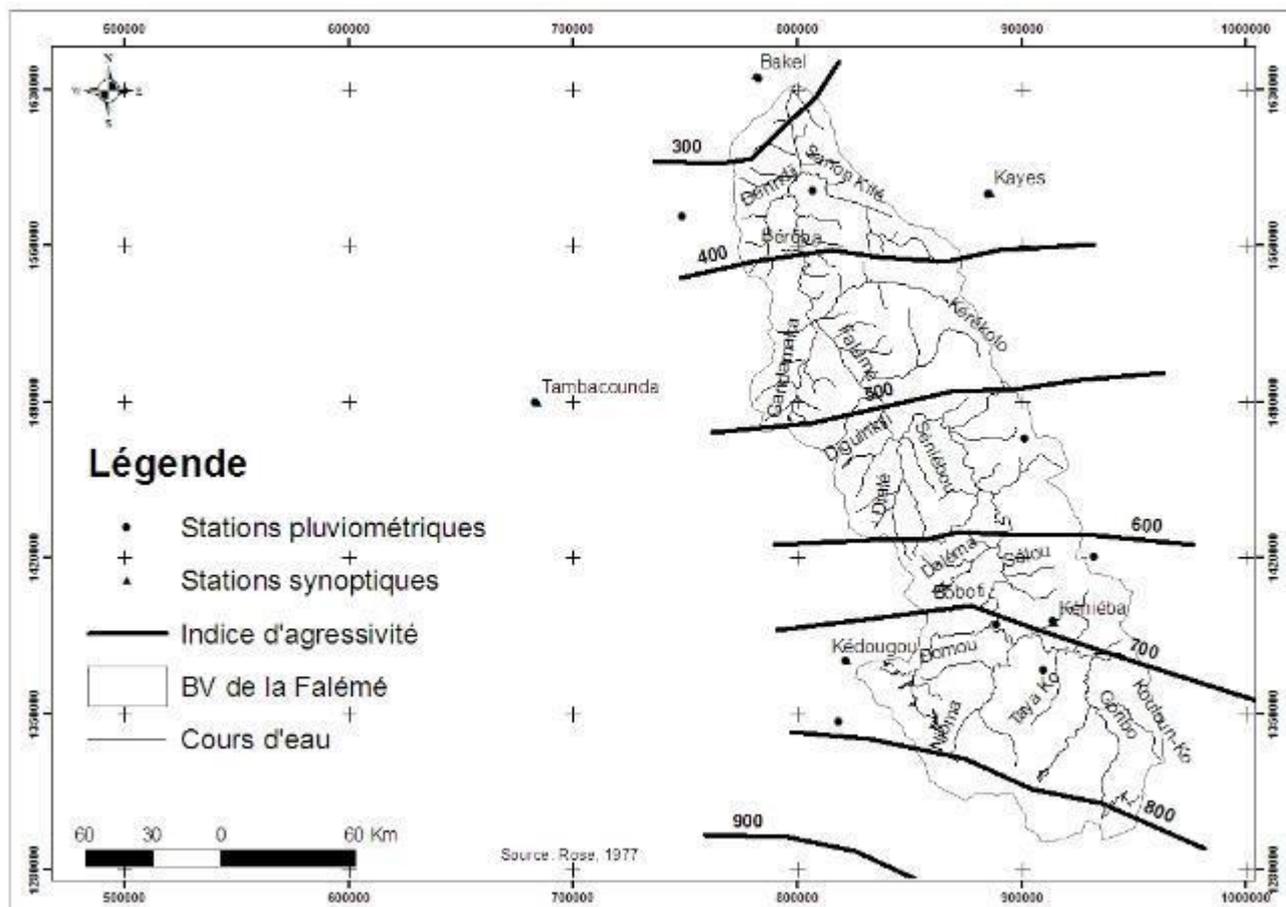


Figure 73 : Variabilité annuelle des précipitations à la station de Labé, Tambacounda, Bakel et Kidira



Carte 28 : Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique moyen (RUSA de Wisheier) dans le bassin de la Falémé (Source : Rose, 1977)

➤ Valeurs des débits : indicateurs Q_{10} , Q_{20} et Q_{100}

L'analyse des indicateurs Q_{10} , Q_{20} et Q_{100} est faite pour les stations du bassin (Fadougou, Gourbassi et Kidira) suivant quatre types de débits caractéristiques : maximaux (débits mensuels maximaux et débits journaliers maximaux) et minimaux (débits mensuels minimaux et débits journaliers minimaux). Pour les débits maximaux, l'accent est mis sur Q_{10} , Q_{20} et Q_{100} de la récurrence humide pour mieux caractériser les situations d'abondance (crues). De même, pour les débits minimaux, l'accent est mis sur les Q_{10} , Q_{20} et Q_{100} de la récurrence sèche pour mieux caractériser les situations de pénuries (étiages). Le **Tableau 120** présente les résultats de l'ajustement de la loi de Goodrich.

Tableau 120 : Valeurs des débits décennaux, vicennaux et centennaux en période sèches et humides de 1954 à 2008

Descripteurs		Débits mensuels maximaux			Débits journaliers maximaux		
		Fadougou	Gourbassi	Kidira	Fadougou	Gourbassi	Kidira
Récurrence sèche	Q_{10} (m ³ /s)	65,6	111	40,4	160	171	184
	Q_{20} (m ³ /s)	103	155	108	212	280	292
	Q_{100} (m ³ /s)	134	196	170	263	366	393
Récurrence humide	Q_{10} (m ³ /s)	543	898	1239	1294	1463	2209
	Q_{20} (m ³ /s)	621	1050	1470	1535	1664	2610
	Q_{100} (m ³ /s)	774	1363	1944	2040	2058	3437
Descripteurs		Débits mensuels minimaux			Débits journaliers minimaux		
		Fadougou	Gourbassi	Kidira	Fadougou	Gourbassi	Kidira
Récurrence sèche	Q_{10} (m ³ /s)	0	0	0	0	0	0
	Q_{20} (m ³ /s)	0	0	0	0	0	0
	Q_{100} (m ³ /s)	0	0	0	0	0	0
Récurrence humide	Q_{10} (m ³ /s)	5,92	0,98	17,5	0,75	0,03	0,40
	Q_{20} (m ³ /s)	12,8	2,81	50,1	2,15	0,08	1,14
	Q_{100} (m ³ /s)	45,4	15,7	280	11,9	0,43	6,36

Annexe 4 : Données sur la modélisation : l'effet de la période sur le calage

Tableau 121 : Résultats fournis par GR2M aux périodes de calage 1981-1994 et 1995-2008 par optimisation du Nash (ln(Q)) et Nash(\sqrt{Q}) : effet de la période sur le calage

Calage sur la période sèche (1981-1994) et Optimisation du Nash (ln(Q))				
Descripteurs		X1-X2-A à caler	X1-X2 à caler -A fixé (moy BV)	X1-X2 à caler -A fixé à 200
Kidira	X1	6,51	7,07	6,51
	X2	0,55	0,72	0,55
	A	337	<u>86</u>	<u>200</u>
	Nash (ln(Q))	89	89	89
Gourbassi	X1	6,52	6,52	6,52
	X2	0,58	0,58	0,58
	A	339	<u>75</u>	<u>200</u>
	Nash (ln(Q))	96,1	96,1	96,1
Fadougou	X1	6,66	6,65	6,66
	X2	0,56	0,55	0,56
	A	390	<u>62</u>	<u>200</u>
	Nash (ln(Q))	76,9	76,9	76,9
Calage sur la période humide (1995-2008) et Optimisation du Nash (ln(Q))				
Descripteurs		X1-X2-A à caler	X1-X2 à caler -A fixé (moy BV)	X1-X2 à caler -A fixé à 200
Kidira	X1	6,32	6,32	6,32
	X2	0,72	0,72	0,72
	A	278	<u>86</u>	<u>200</u>
	Nash (ln(Q))	77,7	77,7	77,7
Gourbassi	X1	6,2	6,48	6,5
	X2	0,6	0,8	0,7
	A	247	<u>75</u>	<u>200</u>
	Nash (ln(Q))	79,4	79,4	79,4
Fadougou	X1	7,08	6,96	6,25
	X2	0,61	0,63	0,58
	A	596	<u>62</u>	<u>200</u>
	Nash (ln(Q))	81,8	81,2	81,4
Calage sur la période sèche (1981-1994) et Optimisation du Nash (\sqrt{Q})				
Descripteurs		X1-X2-A à caler	X1-X2 à caler -A fixé (moy BV)	X1-X2 à caler -A fixé à 200
Kidira	X1	6,37	6,41	6,41
	X2	0,78	0,58	0,58
	A	981.6	<u>86</u>	<u>200</u>
	Nash(\sqrt{Q})	85,9	82,2	82,2
Gourbassi	X1	6,55	6,55	6,55
	X2	0,60	0,60	0,60
	A	351.12	<u>75</u>	<u>200</u>
	Nash(\sqrt{Q})	94,6	94,6	94,6
Fadougou	X1	6,39	6,39	6,39
	X2	0,51	0,51	0,51
	A	296.7	<u>62</u>	<u>200</u>
	Nash(\sqrt{Q})	72,3	72,3	72,3
Calage sur la période humide (1995-2008) et Optimisation du Nash (\sqrt{Q})				
Descripteurs		X1-X2-A à caler	X1-X2 à caler -A fixé (moy BV)	X1-X2 à caler -A fixé à 200
Kidira	X1	6,54	6,54	6,54
	X2	0,72	0,72	0,72
	A	354.87	<u>86</u>	<u>200</u>
	Nash(\sqrt{Q})	74,9	74,8	74,9
Gourbassi	X1	6,72	6,72	6,72
	X2	0,68	0,68	0,68
	A	413.99	<u>75</u>	<u>200</u>
	Nash(\sqrt{Q})	72	75	75
Fadougou	X1	7,57	7,35	7,38
	X2	0,59	0,59	0,59
	A	972.95	<u>62</u>	<u>200</u>
	Nash(\sqrt{Q})	75,4	73	73,5

Le **Nash (ln(Q))** (logarithme népérien des débits) qui est plus sensible aux périodes d'étiages, donne les meilleurs résultats en calage (avec des valeurs élevées) sur les périodes 1981-1994 et 1995-2008. Sur la période 1981-1994, le **Nash (ln(Q))** est égal à 89% à Kidira, 96,1% à Gourbassi, 76,9% à Fadougou. Pour la période 1995-2008, il est de 77,7% à Kidira, 79,4% à Gourbassi et 81,8% à Fadougou. Sur les trois étapes, quelle que soit la méthode d'optimisation utilisée, on obtient les mêmes critères de Nash sur chaque station, à l'exception de Fadougou où il est variable avec 81,8% pour l'étape 1 (meilleure Nash), 81,2% pour l'étape 2 et 81,4% pour l'étape 3.

Le **Nash(\sqrt{Q})** qui est le plus sensible aux débits moyens, confirme l'analyse sur les trois étapes quelle que soit la méthode d'optimisation utilisée, avec des valeurs élevées sur chaque station. En définitive, les critères obtenus avec l'optimisation de **Nash(\sqrt{Q})** et de **Nash (ln(Q))**, même s'ils donnent de bonnes performances, n'ont pas permis de déterminer la meilleure méthode d'optimisation sur les trois étapes adoptées. Afin de déterminer la meilleure méthode d'optimisation, nous avons utilisé le **Nash (Q)** qui est le plus sensible pour reproduire les pics de crue.

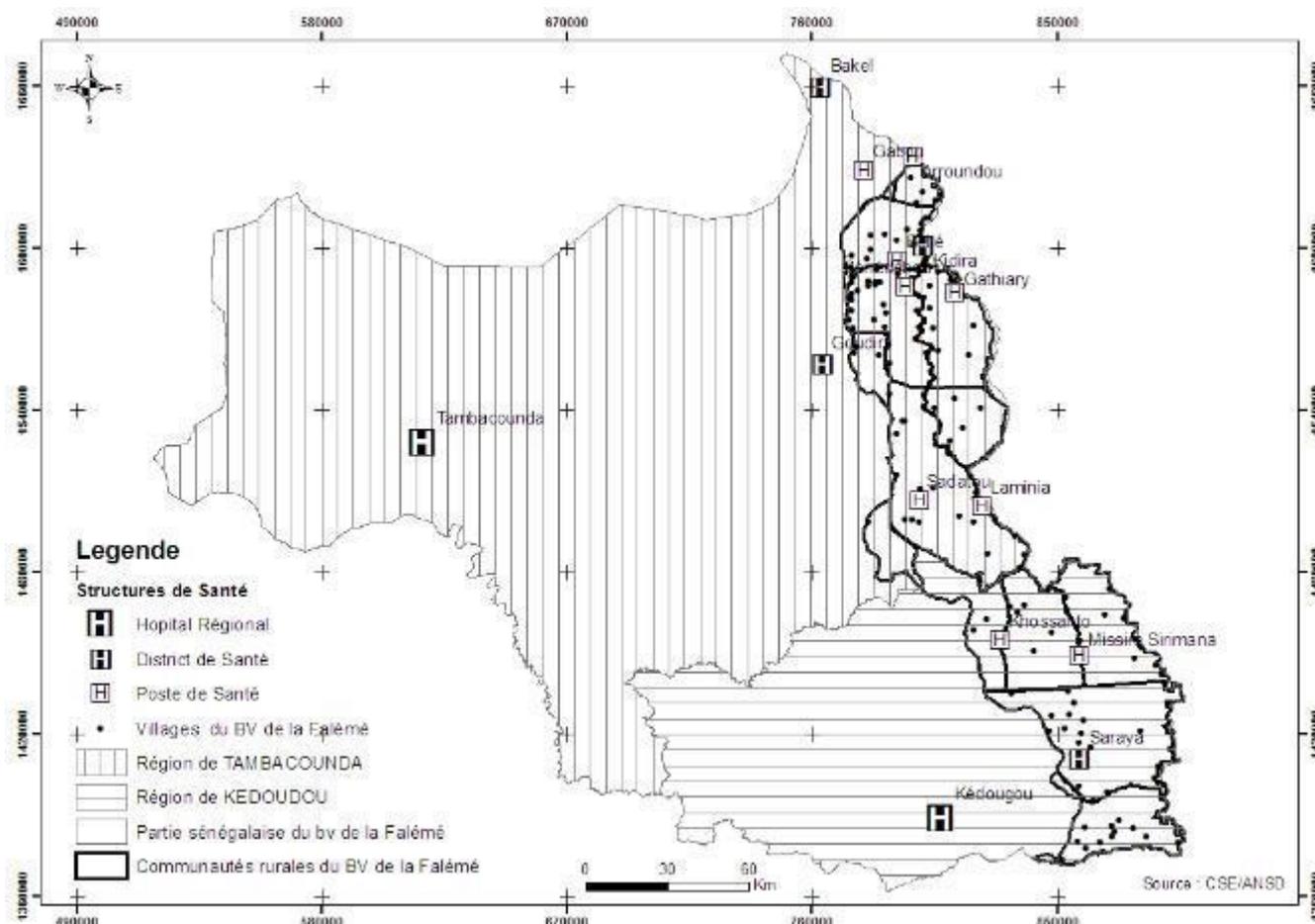
Tableau 122 : Résultats fournis par GR2M aux périodes de calage 1981-1994 et 1995-2008 par optimisation du Nash (Q) : effet de la période sur le calage

Calage sur la période sèche (1981-1994)				
Descripteurs		X1-X2-A à caler	X1-X2 à caler -A fixé (moy BV)	X1-X2 à caler -A fixé à 200
Kidira	X1	7,37	7,07	7,1
	X2	0,76	0,72	0,73
	A	790	<u>86</u>	<u>200</u>
	Nash Q	63	62,1	62,2
Gourbassi	X1	6,7	6,71	6,7
	X2	0,65	0,65	0,65
	A	406	<u>75</u>	<u>200</u>
	Nash Q	89,6	89,7	89,6
Fadougou	X1	6,25	6,25	6,25
	X2	0,47	0,47	0,47
	A	258	<u>62</u>	<u>200</u>
	Nash Q	57,3	57,3	57,3
Calage sur la période humide (1995-2008)				
Descripteurs		X1-X2-A à caler	X1-X2 à caler -A fixé (moy BV)	X1-X2 à caler -A fixé à 200
Kidira	X1	7,69	7,47	7,5
	X2	0,86	0,84	0,85
	A	1091	<u>86</u>	<u>200</u>
	Nash Q	57,5	55,9	56,1
Gourbassi	X1	6,48	7,19	7,2
	X2	0,8	0,73	0,73
	A	730	<u>75</u>	<u>200</u>
	Nash Q	62,7	62,5	62,6
Fadougou	X1	6,42	7,55	7,61
	X2	0,66	0,58	0,59
	A	2261	<u>62</u>	<u>200</u>
	Nash Q	66,2	53,2	54,1

Dans le premier cas, lorsque l'on fait varier que deux (2) paramètres en fixant A à la valeur moyenne Smax, le modèle fournit de bons résultats avec des valeurs de Nash souvent supérieures à 80% (89,7 % à Gourbassi) et le meilleur calage trouvé sur la période humide. Dans le deuxième cas, lorsque les trois (3) paramètres sont à caler, le modèle ne fournit pas de résultats réguliers, quelque soit les options de recherche et d'estimations utilisées. La station de Gourbassi garde toujours le meilleur calage avec 89,6 % suivi de Kidira avec 63 %. Ainsi le modèle fortement influencé par les paramètres de départ, donne des résultats qui ne sont donc pas fiables, puisque l'optimisation des paramètres varie en fonction des nombres inclus dans les cellules de départ. D'autre part, les valeurs optimisées se retrouvent très proches des données de sol initiales.

Annexe 5 : Données sur le milieu et les hommes

➤ Structures de santé, ASC et accès aux services sociaux de base



Carte 29 : Typologies des infrastructures sanitaires dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé

Tableau 123: Noms de quelques ASC présents dans la zone (Source: Résultats d'enquêtes)

Associations	Localités	Significations
1/ASC Yakar, 2/Diaoré inda entre aide	Sénédebou	<ul style="list-style-type: none"> - Se débrouiller localement en fonction des seuls moyens disponibles ; - Etre d'accord sur une même parole ; - Etre d'accord pour s'unir ; - S'associer pour être plus fort ; - S'associer pour être plus efficace ; - S'associer pour avoir des moyens financiers et matériels
1/ Mouvement jeunesse	Naye	
1/ ASC Falémé	Gourel Bocar Samba	
1/ ASC Rénovation du Boundou	Kidira	
1/ Bengadi, 2/ Niansouma	Moussala	
1/ GIE Tessito	Saraya	
1/ASC Jeune originaire de Moussala, 2/Takk deun	Moussala	
1/ Bengadi	Kharakhénia	
1/ Bengadi	Faranding	
1/ Bengadi, 2/ Groupe Sénégalais	Wortokhaty	
1/ Bengadi, 2/ Benkouta	Toumbifara	
1/ Fanafa	Dalaba	
1/ Tassate, 2/ Gnassouma; 3/ Bengadi	Sékhoto	
1/ Mbakhambakéta, 2/ Wakilo	Damabala	
1/ Mbakhambakéta	Bokhody	
1/ Wakilor, 2/ Woulanafa	Daloto	
1/ SEGA, 2/ Fantasakiliba	Dyabougou	
1/ Bengadi, 2/ Benkouta	Dyala Bakary	

Tableau 124 : Proportion de la population ayant accès aux services sociaux ciblés et indice d'accès global selon la communauté rurale dans la partie sénégalaise du bassin de la Falémé

ARRONDISSEMENTS	COMMUNAUTES RURALES	NOMBRE DE VILLAGES	NOMBRE D'HABITANTS	POURCENTAGE DE LA POPULATION RURALE AYANT ACCES A					NOTES ATTRIBUEES SELON LE NIVEAU DE L'ACCES					INDICE D'ACCES
				POINT D'EAU	ECOLE PRIMAIRE	POSTE DE SANTE	COMMERCE	ROUTE	POINT D'EAU	ECOLE PRIMAIRE	POSTE DE SANTE	COMMERCE	ROUTE	
Arrondissement de Kéniéba	CR de Gathiary	9	2438	98,8	94,9	43,0	43,0	13,5	100	100	0	0	0	200
	CR de Médina Foulbé	13	2148	60,0	72,3	0,0	51,4	0,0	50	50	0	50	0	150
	CR de Sadatou	21	11524	87,6	87,5	33,2	43,7	35,8	100	100	0	0	0	200
Arrondissement de Bellé	CR de Bellé	34	21511	63,8	59,5	22,6	56,0	42,2	50	50	0	50	0	150
	CR de Sinthiou Fissa	24	7879	92,5	94,6	6,9	73,2	66,3	100	100	0	50	50	300
Arrondissement de Moudéry	CR de Ballou	10	23073	77,9	100,0	58,7	100,0	54,8	100	100	50	100	50	400
	CR de Gabou	37	17334	88,6	89,2	30,6	100,0	54,0	100	100	0	100	50	350
Arrondissement Boyngel Bamba	CR de Dougue	19	5909	86,6	83,2	42,5	85,9	65,7	100	100	0	100	50	350
Arrondissement Dianke Makha	CR de Bani Israel	9	1874	83,3	83,5	51,7	83,5	71,9	100	100	50	100	50	400
Arrondissement de Bambou	CR de Bambou	21	6918	83,5	98,7	36,3	31,7	85,8	100	100	0	0	100	300
	CR de Médina Baffé	24	5785	85,2	94,6	16,5	39,2	36,7	100	100	0	0	0	200
Arrondissement de Sabodala	CR de Sabodala	13	6160	90,8	100,0	0,0	94,1	83,7	100	100	0	100	100	400
	CR de Khossanto	10	9451	100	95,5	39,4	100	44,0	100	100	0	100	0	300
	CR de Missira Sirimana	19	7208	76,6	98,4	22,3	97,5	57,9	100	100	0	100	50	350
Arrondissement de Fongolimbi	CR de Dimboli	17	5141	96,9	90,8	54,7	61,7	60,2	100	100	50	50	50	350
Total/moyenne	15	280	134353	84,8	89,5	30,6	70,7	51,5	93,3	93,3	10	60	36,7	293

(Source ANSD : Enquête villages de 2009 sur l'accès aux services sociaux de base, rapport final, Dakar, décembre 2009)

Selon l'ANSD, 2009 « l'accès des populations d'un village à un service est mesuré par la présence et l'implantation de l'infrastructure dans le village même ou dans une autre localité située à une certaine distance relativement courte. Pour chaque service, un indice élémentaire est calculé. Ces indices élémentaires varient de 0 à 100. La valeur 100 est affectée si le niveau de l'indice élémentaire est supérieur ou égal à 75%, c'est-à-dire, si 75% de la population de la communauté rurale ont accès au service considéré. La valeur 50 est attribuée si le niveau de l'indice élémentaire est inférieur à 75% et supérieur ou égal à 50%, c'est-à-dire, si la proportion de la population de la communauté rurale qui a accès à l'infrastructure considérée est comprise entre moins de 75% et 50%. La valeur 0 est affectée si le niveau de l'indice élémentaire est inférieur à 50%, c'est-à-dire, si moins de 50% de la population de la communauté rurale ont accès à l'infrastructure considérée. Par convention, l'indice d'accès global ou indice composite d'accès, est obtenu en faisant la somme des indices élémentaires ».

· I_{eau} : la proportion d'individus ayant accès à une source d'approvisionnement d'eau potable comme un robinet/borne fontaine, un forage ou un puits moderne dans le village ou à moins d'un kilomètre du village ;

· I_{ecole} : la proportion d'individus ayant accès à une école primaire dans le village ou à moins de trois kilomètres du village ;

· $I_{santé}$: la proportion d'individus ayant accès à un poste de santé dans le village ou à moins de cinq kilomètres du village ;

· $I_{commerce}$: la proportion d'individus pouvant accéder à un lieu de commerce : une boutique dans son village ou un marché hebdomadaire dans le village ou à moins de cinq kilomètres du village ;

· I_{route} : la proportion d'individus ayant accès à une route (butimée ou latéritique) dans le village ou à moins de cinq kilomètres du village.

➤ Un système éducatif profondément inégalitaire et peu performant

La nouvelle politique de l'Etat en matière d'éducation et de formation notifiée à travers le « Plan Décennal de l'Education et de la Formation » a apporté des innovations importantes sur le système éducatif dans le bassin. Ainsi, les effectifs n'ont cessé de croître au fil des années grâce aux recrutements massifs d'enseignants, toutes catégories confondues (volontaires, vacataires et contractuels). Ce qui a contribué de façon significative à la résorption du déficit d'enseignants, l'augmentation du taux de scolarisation et la création d'infrastructures scolaires, notamment des écoles et des collèges de proximité même dans les villages les plus reculés du bassin.

Malgré les efforts fournis, le besoin se fait toujours sentir dans le bassin. Plusieurs villages ont soit un cycle primaire incomplet, soit une école constituée d'abris provisoires. Le nombre de salles de classes varie entre 1 et 2 par village, et le nombre d'élèves recensés par école dépasse rarement 45 élèves. A cette insuffisance de salles de classes fonctionnelles s'ajoute un déficit en personnel enseignant. Cela étant, le système de classes multigrades est appliqué dans de nombreux établissements (dans presque tous les villages d'enquête) et le taux de scolarisation relativement faible du fait du peu d'intérêt que beaucoup de parents accordent à la scolarisation de leurs enfants dans le bassin.

Dans de nombreux villages du bassin, la frénésie qu'a connue l'école durant les années précédentes est actuellement altérée par un nouvel engouement avec la multiplication des placers d'or, un phénomène qui affecte tous les villages interrogés. Les propos de M Sagna, enseignant à Moussala en illustre : « *Quand je suis venu à l'école en 2006, il y avait plus de 100 élèves inscrits. Cette année (2011), avec la découverte de placers d'or, les élèves ont abandonné en masse et l'école ne compte désormais que 15 élèves répartis sur deux niveaux. Par conséquent, deux de mes collègues qui enseignaient à l'école au début de l'année scolaire sont réaffectés dans d'autres établissements* ».

Le goût de l'argent "facile" généré par l'exploitation de l'or, pousse les populations, mêmes celles qui étudient, à abandonner l'école pour rejoindre les placers. Poursuit M Sagna : « *Même les élèves qui sont au cycle moyen-secondaire dans les centres villes comme Tambacounda, Kédougou, Kidira, Saraya ne sont pas épargnés. Ils subissent fortement l'influence de leurs camarades, voire de certains parents qui les poussent à la sortie, afin de rejoindre les placers d'or et gagner beaucoup d'argent* ».

Le constat est partagé par tous les enseignants rencontrés dans le bassin. M Diatta, enseignant à Niéniéko, souligne les propos tenus, lors d'une discussion, par un de ses anciens élèves : « *Comme nous étudions pour gagner de l'argent, alors que maintenant l'exploitation de l'or nous permet d'en gagner beaucoup et le plus rapidement possible, qu'est ce qui pourrait encore nous retenir à l'école ?* ». Cet abandon excessif de l'école trouve aussi son explication dans l'attitude de certains parents qui pensent que l'école sénégalaise ne réussit pas trop à leurs enfants.

➤ Une ligne de frontière ignorée

Dans les villages sénégalais de l'enquête qui ne sont séparés de villages maliens que par le cours de la Falémé, l'existence de la frontière n'est qu'administrative. Il s'agit de Kidira et Diboli, de Naye et Momori, d'Arroundou et Gouthioubé, de Soréto et Massakama, d'Elimalo et Wayaga, de Moussala (Sadatou) et Moussala Mali dans la zone de Kidira ; de Moussala et Mahinamine, de Saeinsoutou et Gourbassi, de Wortokhaty et Farinkounda, de Sékhoto et Kéniékéniéba dans la zone de Saraya.

La ligne de frontière définie par les Etats n'engage pas trop les populations des villages cités ci-dessus. La frontière est ignorée et les populations expriment davantage un sentiment d'appartenance à leur ethnie et à leur clan qu'à leur nation. Pour preuve, dans les villages de Moussala, Sansamba, Niéniéko..., (zone de Saraya), les principaux sites d'orpaillage sont localisés en territoire malien. Chaque jour et à toute heure, elles peuvent traverser la Falémé pour pratiquer leurs activités sans aucune contrainte. Ce lien familial est plus confirmé par les liens de mariages qui sont fréquents entre les populations de part et d'autre du cours d'eau, sans que la frontière ne soit prise comme une contrainte. Unies par des liens de sang, de mariage et de voisinage, les populations de ces villages

partagent les moments de joie et de peine. Dans la zone de Saraya au niveau les placers d'or, il y a arrêt de l'exploitation chaque fois qu'il y a décès, du côté sénégalais comme malien.

L'enclavement de la zone et son oubli sur la plupart des programmes de développement aurait certainement poussé les populations à se tourner vers leurs parents maliens pour des relations d'échanges. Dans la zone de Saraya, avec l'absence de médias sénégalais (ni la RTS : radio et télé, ni le réseau téléphonique du Sénégal, ne sont disponibles dans certains villages), les populations utilisent les médias maliens et le réseau Malitel pour leurs besoins d'information et de communication.

Il faut cependant noter la réticence de certaines autorités maliennes (chefs et sages de villages) à Momori et Diboli lorsque nous avons voulu y faire des enquêtes. A Diboli, un conseiller local nous a même demandé une autorisation délivrée par tous les pays se partageant le cours d'eau. D'autres disaient : « *Vous devez être accompagnés de nos camarades étudiants maliens pour faire un tel travail car les ressources de la Falémé ne sont pas strictement sénégalaises, mais partagées* ».

L'idée de l'absence de frontière est aussi très ancrée dans la mémoire des autorités locales sénégalaises. En effet, dans les villages visités, les populations disaient qu' « *Entre le Sénégal et le Mali, il n y a pas de barrières, mais un cours d'eau que nous partageons* ». Dans le village de Moussala qui fait face au village malien de Mahinamine, le chef de village (M Soutoucumba Cissokho) parlait d'« *Un seul village avec deux hameaux séparés par le cours de la Falémé* ». D'autres personnes interrogées affirmaient qu' : « *Entre le Sénégal et le Mali, il n y a pas deux, mais un même peuple, surtout dans tous les endroits immédiats du cours de la Falémé et même en profondeur* ». Mieux encore, pour l'identification des acteurs par activité entre "locaux et étrangers, sénégalais et maliens", les personnes interrogées disaient que : « *Quelle que soit l'activité, tous les exploitants sont des locaux, qu'ils soient des Sénégalais ou des Maliens, il n y a pas de différence, c'est le même peuple* ».

➤ **Un nouveau découpage administratif, source de tensions territoriales**

Le nouveau découpage administratif de la région de Tambacounda et l'érection de Kédougou en chef lieu de région n'ont pas manqué d'entraîner un bouleversement profond dans la zone de Saraya. Selon les personnes interrogées, le découpage a été fait sans l'implication des populations locales et des réalités du milieu. Avant l'érection de Kédougou en région, Saraya était un arrondissement et un chef lieu de communauté rurale tout comme Khossanto, Missira Sirimana et Médina Baffé. Avec l'érection de Kédougou en région, Saraya et Salémata sont devenus des départements. Dans ce nouveau département de Saraya, Bembou et Sabodala qui furent des villages, deviennent des arrondissements et chefs-lieux de communauté rurale. Les choix de Bembou et Sabodala en tant qu'arrondissements s'expliquent respectivement par la zone de carrefour et par le développement industriel et minier.

Comme dans la localité l'absence de moyens de transport et l'enclavement sont quelques uns des problèmes les plus cruciaux, le nouveau découpage est devenu une source de conflits entre localités, surtout si les distances à parcourir pour l'obtention de papiers administratifs sont revues à la hausse : les populations de la CR de Médina Baffé qui obtenaient leurs papiers administratifs à Saraya sont maintenant obligées d'aller jusqu'à Saraya et, à partir de là, rejoindre l'arrondissement de Bembou auquel leur nouvelle CR est maintenant rattachée.

Pour les populations des CR de Khossanto et Missira Sirimana, il est injuste que Sabodala, ancien village, soit érigé en arrondissement auquel elles sont aujourd'hui rattachées. Ainsi elles continuent de manifester leur mécontentement jusqu'au point de refuser d'aller à Sabodala quand le besoin de papiers administratifs se fait sentir. Dans la même mouvance, l'autorité du Sous-préfet de Sabodala est contestée et rejetée dans les dites CR. Celui-ci a même frôlé la mort un jour pour s'être rendu à Missira Sirimana. N'eut été l'intervention d'un habitant, des populations révoltées lui auraient fait mal. Il a fallu l'intervention de forces de l'ordre pour qu'il soit libéré, alors que sa voiture fut entièrement saccagée. La liste des exemples n'est pas exhaustive et les populations protester de manifester contre « un découpage jugé incorrect ».

Annexe 6 : Données sur les ressources naturelles et l'économie rurale

➤ Espèces végétales utilisées et calendrier des activités

Tableau 125: Espèces ligneuses appréciées par le cheptel

Espèces ligneuses appréciées	Ordre d'appétit			Parties consommées											
				Feuilles fraîches			Feuilles sèches			Fleurs			Fruits		
	bovin	Ovin	Caprin	bovin	ovin	Caprin	Bovin	ovin	caprin	Bovin	ovin	Caprin	bovin	ovin	Caprin
<i>Acacia seyal</i>	1	1	1												
<i>Guiera senegalensis</i>	2	2	9												
<i>Combretum glutinosum</i>	3		2												
<i>Grewia bicolor</i>	4	3	4												
<i>Pterocarpus lucens</i>	5	4	5												
<i>Combretum aculeatum</i>	6	7	10												
<i>Zizuphus Mauritania</i>	7	6	6												
<i>Accacia nilotica</i>		5	7												
<i>Balanites aegyptiaca</i>		8	11												
<i>Combretum micranthum</i>			3												
<i>Acacia senegal</i>			8												
Total				7/11	8/11	11/11	4/11	6/11	8/11	0/11	1/11	3/11	2/11	4/11	8/11

Légende utilisé non-utilisé

Source : Inspection Régionale des Eaux et Forêts (IREF) de Tambacounda adaptée par Faye C.

Tableau 126: Calendrier annuel d'activités des populations (Source: Résultats d'enquêtes)

DESCRIPTEURS	MOIS DE L'ANNEE												Nombre	
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
ACTIVITES ANNUELLES														12
AGRICULTURE SOUS PLUIE														7
Défrichage	O	O	O											3
Désherbage				O										1
Semis du mil, du fonio, du maïs et du coton						O	O							2
Semis du riz							O	O	O					3
Semis arachide								O						1
Sarclage mil et maïs								O	O					2
Sarclage arachide									O	O				2
Repiquage riz									O					1
Récoltes maïs, fonio, mil, arachide, coton									O	O	O			3
Commercialisation des spéculations s'il y a surplus												O		1
AGRICULTURE DE DECRUE ET MARAICHAGE	O	O	O	O							O	O	O	7
Culture de décrue	O	O	O	O							O	O	O	7
Maraichage	O	O	O	O							O	O	O	7
Réparation des habitations	O	O	O	O										4
ELEVAGE	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12
Parcage du bétail	O	O	O	O	O								O	6
Vaine pâture						O	O	O	O	O	O			6
EXPLOITATION FORESTIERE	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12
Pain de singe				O	O	O	O							4
PECHE	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12
Pêche au niveau de la Falémé Campement	O	O	O	O	O									5
COMMERCE ET ARTISANAT	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12
Commerce continue toute l'année (vente de l'or)	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12
ORPAILLAGE	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12
Orpillage alluvionnaire pratiquée par les femmes	O	O	O	O										4
CHASSE	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12
Petite chasse dans les zones amodiées	O	O	O	O										4
CUEILLETTE	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	12

Légende présent O absent

Tableau 127 : Synthèse des espèces utilisées et des types d'utilisation dans les villages visités (Source: Résultats d'enquêtes)

Descripteurs		PARTIES UTILISEES								TYPES D'UTILISATION					
Noms malinké	Noms français ou wolof	Racine	Tronc	Branche	Feuille	Fruit	Ecorce	Sève	Nombre	Alimentation des hommes	Alimentation du bétail	Meuble	Cuisson	Usages médicales	Nombre
Sibo	Rônier								3						5
Bo	Bambou								2						2
Guéno	Ven								4						3
Sito	Baobab								3						3
Kunkisito	Gommier								2						2
Sékhéo	Kinkéliba								1						3
Sayong	mimosa épineux								4						2
Sékhéno	dattier sauvage								3						5
Dlibidjabo									4						4
Dougouto	Dimb								1						3
Kukuo	Alom								4						2
Séno									6						4
Khountang									5						3
Tomborong	Jujubier								3						4
Sambé koye	Kel								3						1
Touro									3						3
Saba	Mad								1						3
Wolo									3						3
Gumbé	Nger								1						2
Djabé	Foudène								1						2
Timbing	Tamarinier								2						4
Total		5	6	7	17	15	9	0	59	14	19	3	9	17	63

utilisé non utilisé

➤ **Des ressources pédologiques riches et variées**

Tableau 128 : Caractérisations des sols dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)

Sols	Caractéristiques
Cuirasse (couro)	Ils colonisent les plateaux et plaines qui ne portent aucune culture, et sont souvent à nu, la végétation y poussant difficilement.
Argile (bokho)	Ils sont présents sur les berges et les bas-fonds portant souvent les cultures de décrue et le maraîchage. Ce sont des dépôts récents des vallées très souvent inondés par les crues.
Sable (kénio)	Ils couvrent des zones de plaines et portent la culture de l'arachide (principale spéculation des femmes). Ainsi il s'agit d'un assez bon sol.
Limon (banco-fingo)	Ils sont présents sur les zones de plaines avec des terres perçues comme plus riches aux alentours des habitations.
argilo-sableux (kénio-banco)	Ils sont caractérisés par les sols de couleur blanchâtre utilisés pour la culture de l'arachide et du fonio, et qui exigent de longues jachères.

Tableau 129 : Autres caractéristiques des sols dans les villages interrogés (Source: Résultats d'enquêtes)

Descripteurs	Sols représentés		Sols donnant le rendement le plus élevé	
	Nb.Cit	Fréquence	Nb.Cit	Fréquence
Cuirasse (couro)	108	38,1%	23	9,8%
Argile (bokho)	94	32,3%	148	63,2%
Sable (kénio)	53	12,4%	33	14,1%
Autres sols	36	7,2%	30	19,9%
Total	291	100%	234	100%

➤ **Des ressources fauniques dans un contexte de raréfaction**

Tableau 130 : Synthèse des espèces animales dans les villages (Source : service des eaux et forêts et enquêtes)

Différents groupes	Variétés d'espèces	Espèces plus représentées	Espèces moins représentées (en voie de disparition)	Espèces disparues
Mammifères	Zèbres, Hyènes, Chacals, Phacochères, Singes, Hippopotames, Biches	Phacochères, Singes, Chacals	Hyènes, Hippopotames, Biches,	Lions, Buffles, Elan de Derdy, Zèbres, Tigres, Panthères
Reptiles	Serpents, Crocodiles	Serpents	Crocodile	-
Oiseaux	Perroquets, Pigeons, Pintades, Rouges becs, Perdrix, Francolins, Tourterelles, Calaos	Perroquets, Pigeons, Pintades, Perdrix, Rouges becs	Francolins, Tourterelles, Calaos	Kinfong (nom local)
Rongeurs	Rats, Rats palmistes	Rats	-	Porcs épics

➤ **Des ressources minières abondantes et diverses**

Tableau 131: Réserves de gisement de fer (Source : Service Régional de l'Energie, des Mines et de l'Industrie (SREMI) de Tambacounda)

Gisements	Réserves prouvées de gisement de fer (en millions de tonnes-MT)						Réserves probables et possibles de fer (en millions de tonnes-(MT)		
	Minerai superficiel		Minerai profond		TOTAL		Réserves probables	Réserves possibles	TOTAL
	M.T	% Fe	M.T	% Fe	M.T	% Fe	MT	MT	
Koudékourou	42	51,7	199	61,1	241	59,5	42	30	72
Kouroudiakou	7	52	35	61,6	42	60	5	ND	5
Karakaéne	23	51,2	31	60,4	54	56,6	19	ND	19
Kouroukobi							5	5	10
Farangalia Goto							30	ND	30
Safa							ND	10	10
TOTAL	72		265		337				

NB : MT (millions de Tonne), ND (non déterminé)

Tableau 132: Gisements d'or de la région de Kédougou (Source : SREMI – Tambacounda)

Sites	Réserves estimées	Production annuelle en 2000	Nombre d'actifs en 2000
Sabadola	2754 kg		
Kerekounda	2230 kg		
Total région	30 tonnes	500 kg	3000

Tableau 133: Gisements de marbre de la région de Kédougou (Source : SREMI – Tambacounda)

Sites	Réserves prouvées	Réserves estimées
Ibel	169.120	305.740
Bandafassi		4.320
Ndebou		800.000

Tableau 134: Caractéristiques de l'orpaillage dans le bassin (Source : Résultats d'enquêtes)

Constatez-vous une diminution des surfaces cultivées ?	Nb. Cit.	Fréq.	Comment sont les conséquences de l'exploitation de l'or ?	Nb. Cit.	Fréq.
Non réponse	23	7,8%	Non réponse	96	32,7%
Oui	147	50,0%	Positives	198	67,3%
Non	124	42,2%	Négatives	0	0,0%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	
Comment est la nature des surfaces exploitées ?	Nb. Cit.	Fréq.	Comment est le rôle joué par la Falémé ?	Nb. Cit.	Fréq.
Non réponse	97	33,0%	Très important	221	76,5%
Petites	177	60,2%	Important	21	7,1%
Grandes	20	6,8%	Peu important	2	0,7%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	
Quels est le type de sol favorable ?	Nb. Cit.	Fréq.	Quels produits utilisez-vous pour laver l'or ?	Nb. Cit.	Fréq.
Non réponse	99	33,7%	Aucun	103	35,0%
Cuirasse	135	45,9%	Mercure	91	31,0%
Argile	66	23,1%	Cyanure	0	0,0%
TOTAL OBS.	294	100%	TOTAL OBS.	294	

Tableau 135: Activités commerciales et mode d'utilisation des ressources dans le bassin de la Falémé (Source: Résultats d'enquêtes)

Les principaux produits commercialisés	Nb. Cit.	Fréq.	Les lieux de commerce de la Falémé	Nb. Cit.	Fréq.
Agricoles	269	91,5%	Villages	239	81,3%
Animaux	266	90,5%	Centres urbains	207	70,4%
Autres	211	71,8%	Marchés	95	32,3%
TOTAL OBS.	294		TOTAL OBS.	294	
Les principales utilisations des ressources végétales	Nb. Cit.	Fréq.	Quelles sont les techniques de protection des ressources végétales ?	Nb. Cit.	Fréq.
Cuisson	283	96,6%	Espèces protégées	253	86,1%
Habitations	283	96,6%	Forêts classées	18	6,1%
Meubles	252	85,7%	Clôtures	9	3,1%
Bois de vente	9	9,9%	Non réponse	31	10,5%

➤ **Des ressources naturelles soumises à une forte dégradation**

Tableau 136 : Types de feux de brousse dans le bassin de la Falémé (Source : Mbow C, 2004 et Résultats d'enquêtes)

Types de feux	Réserves estimées
Des feux pré-culturaux	Comme l'agriculture itinérante impose que l'on défriche chaque année de grandes superficies de nouvelles terres boisées, le défrichage est souvent fait par le feu.
Des feux pastoraux	Les pasteurs ont souvent recours au feu (généralement de novembre à mars) pour favoriser la repousse de graminées nutritives très appréciées par le bétail.
Des feux de chasse	Les chasseurs font aussi parfois leur battue à l'aide des feux de brousse.
Des feux préventifs	Ils sont aussi dans certains cas utilisés à des fins préventives : la mise à feu.
Des feux accidentels	Ils sont dus à l'imprudence, l'inconscience ou la négligence des hommes.

Tableau 137 : Matrice d'évolution des différentes ressources dans la zone d'étude (Source : Touré B., 2002 et Résultats d'enquêtes)

Ressources	Passé	Présent	Futur
Hydriques	++++	+++	++
Pédologiques	++++	+++	++
Végétales	++++	++	+
Faune continentale	++++	++	+
Faune aquatique	+++	++	+

++++ **Très abondantes ;**

+++ **Abondantes ;**

++ **Peu abondantes ;**

+ **Rares.**

Tableau 138 : Différentes causes de dégradation des ressources pédologiques et biologiques dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)

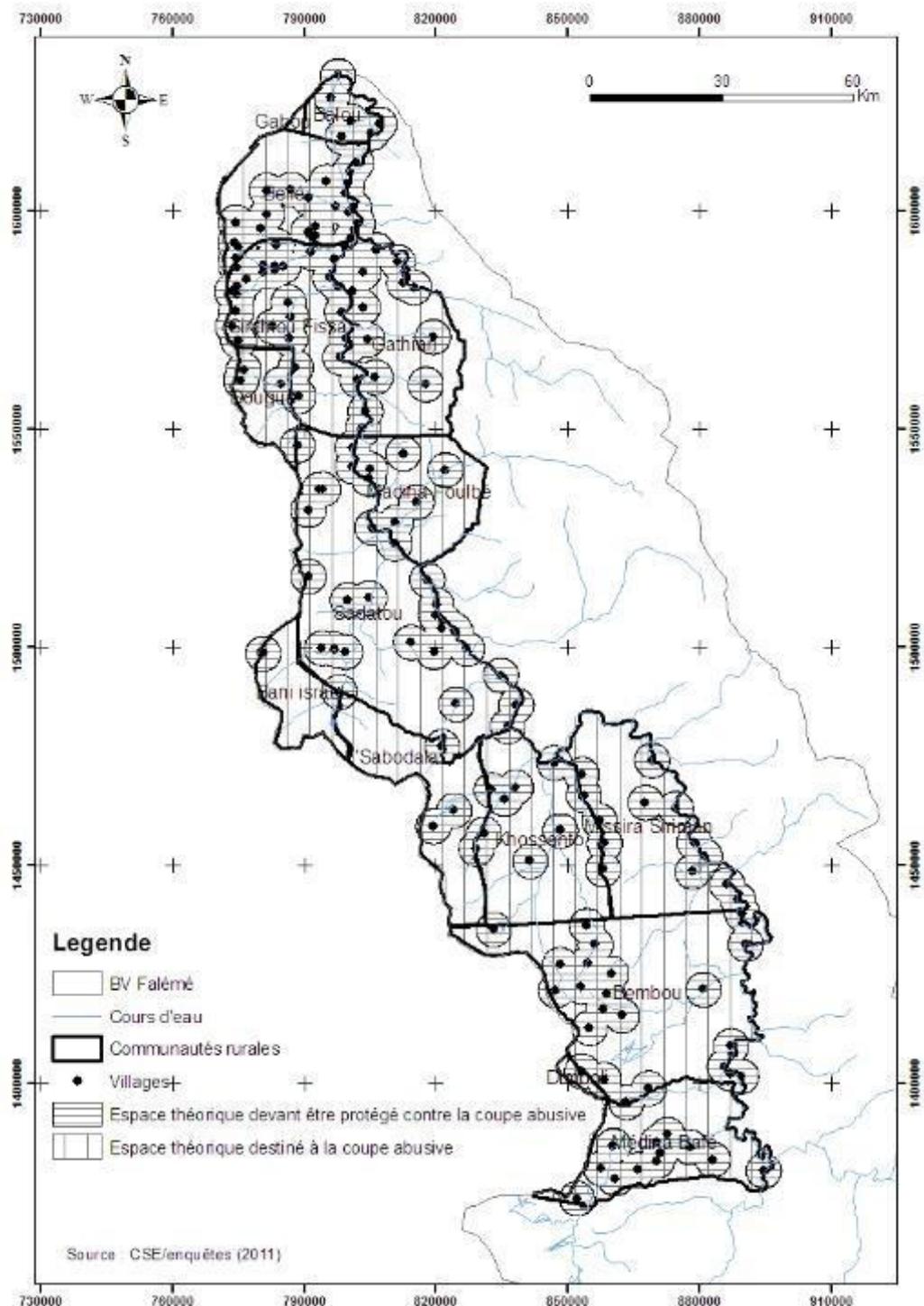
Problèmes	Symptômes	Causes techniques	Causes socioéconomiques	Causes institutionnelles	Causes sociopolitiques
Dégradation des ressources pédologiques	Biomasse aérienne basse ; Fertilité décroissante du sol.	Réduction des pratiques traditionnelles de gestion de la fertilité (jachères, rotations...) ; Changement climatique (lessivage des nutriments dû à l'intensité forte des pluies).	Pratiques agricoles non durables – épuisement des éléments nutritifs ; Taux élevés de croissance démographique ; Pratiques locales impropres.	Incapacité des services de vulgarisation à aider les utilisateurs des terres à s'adapter aux changements.	Politiques agricoles et démographiques mal comprises et inadaptées.
	Érosion diffuse du sol	Faible couvert végétal ; Faible quantité de matière organique du sol ; Manque d'entretien des structures de lutte contre l'érosion Changement climatique (précipitations moins abondantes).	Excès de labour ; Non-disponibilité de matière organique/fumier ; Piétinement du bétail (autour des points d'eau, ouvrages de dérivation d'eau sur berges du cours d'eau,).	Limitation des services agricoles.	Manque d'application efficace des politiques relatives à la gestion des terres.
Dégradation des ressources biologiques (végétales et fauniques)	Présence réduite ou disparition d'espèces sauvages et agricoles indigènes.	Excès de déforestation ; Concentration d'un nombre limité d'espèces agricoles ; Surpâturage ; Excès de labour.	Pression sur les terres ; Pratiques agropastorales impropres ; Surexploitation des produits forestiers.	Inadéquation des services agricoles et forestiers. Inefficacité des structures de gestion de la faune sauvage, agricole et environnementale ; Manque d'appréciation des avantages des approches intersectorielles ; Manque de reconnaissance et de promotion des potentialités des races locales de la part des services agricoles.	Manque d'application des lois, politiques et règlements administratifs relatifs à l'environnement. Manque de compréhension de la part des utilisateurs des terres des lois, politiques et règlements administratifs ; Manque de mise en œuvre efficace des lois, politiques et règlements administratifs.
	Réduction des populations, disparition des espèces animales (sauvages et domestiquées), d'oiseaux et de reptiles.	Destruction des habitats et réduction des ressources alimentaires ; Promotion des races exotiques ; Braconnage ; Techniques et matériel de pêches impropres.	Pression sur les terres ; Pression de la population ; Demande croissante de gibier, animaux vivants ; Activités de chasse et de pêche excessives et anarchiques.		
	Destruction des habitats de la faune	Déforestation, Conversion des pâturages en petites parcelles agricoles,	Pression sur les terres ; Pratiques agropastorales impropres.		

Tableau 139 : Hypothèses de solutions aux problèmes de dégradation des ressources pédologiques et biologiques dans le bassin de la Falémé (Source : Résultats d'enquêtes de terrain)

Types de ressources	Symptômes	Actions prioritaires
Ressources Pédologiques	Érosion diffuse du sol	lutter contre l'érosion hydrique et éolienne Protéger les sols ; Protéger la végétation afin que le sol reste couvert pour faire face à la dessiccation et au ravinement.
	Dégradation des berges	Établir des politiques et de pratiques rationnelles d'utilisation des terres agricoles ; Promouvoir des programmes de conservation de restauration des sols ; Promouvoir des mesures anti-érosion.
Ressources biologiques (végétales et fauniques)	Déboisement	Restaurer les forêts ; Encourager la création d'aires protégées et de réserves forestières ; Gérer les forêts naturelles.
	Surpâturage	Élaborer une réglementation adaptée en matière de gestion du bétail ; Renforcer la gestion communautaire des pâturages des plaines d'inondation ; Intégrer la gestion du bétail et du programme d'irrigation.
	Feux de brousse	Eviter d'allumer des feux de brousse tardifs, en saison sèche ; Faire des feux de brousses pendant la saison humide (feux précoces).
	Dégradation de la faune, de la flore et	Appliquer des règlements appropriés en matière de protection de la faune et de la flore ; Élaborer un plan de gestion et une politique de gestion de l'environnement ; Suivre l'état de l'environnement ; Apporter de l'eau aux terres humides.

➤ **La transhumance, une source de dégradation de l'environnement et stratégies de lutte**

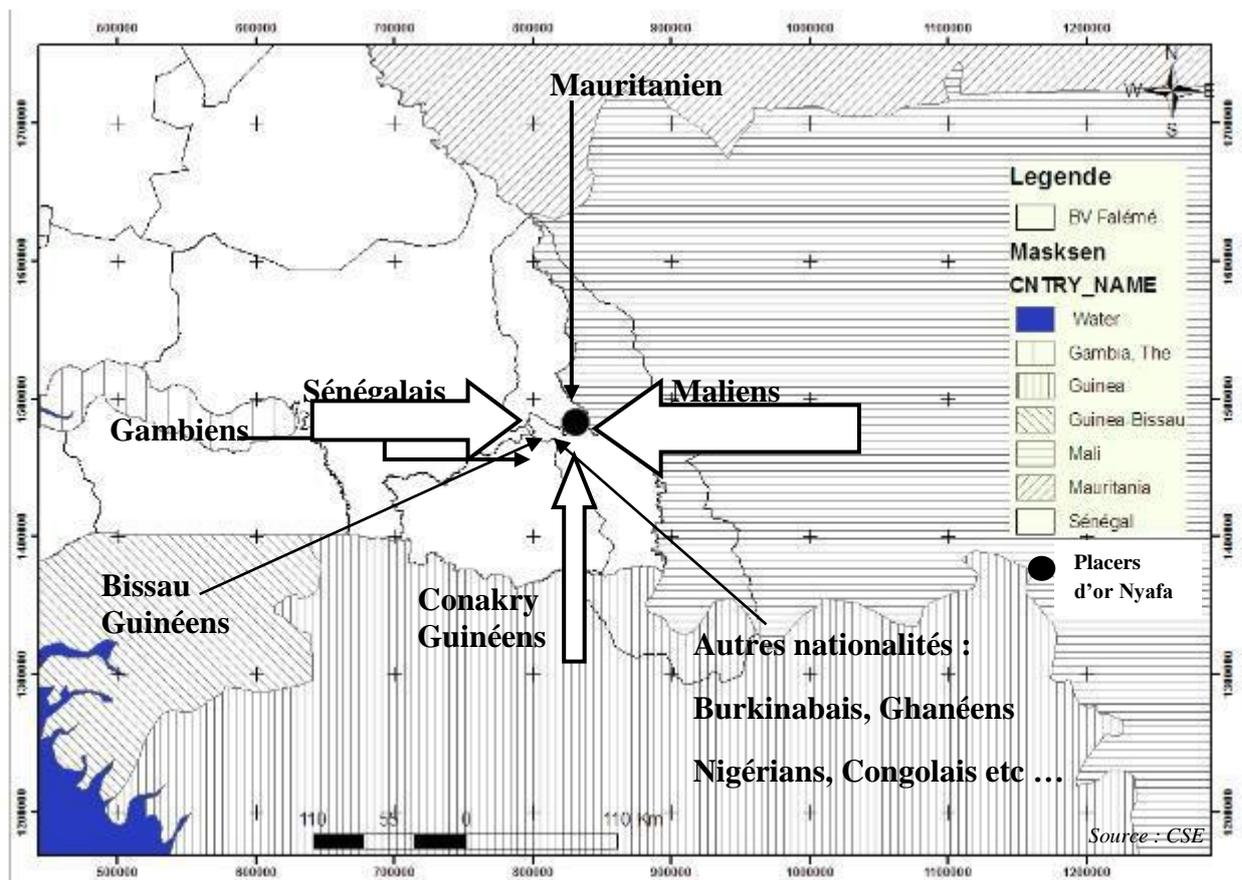
La transhumance dans le bassin de la Falémé a une grande ampleur. Dans les zones de Kidira comme dans celle de Saraya, elle revêt deux aspects : la transhumance faite par les Peuls et la transhumance faite par les Maliens. La transhumance entraîne une dégradation de l'environnement, ce qui pousse les populations à lutter contre. Compte tenu de l'étendue de l'espace et du manque de contrôle, les populations s'organisent en comité de gestion, au sein de chaque village, pour empêcher les transhumants de couper des arbres sur une surface allant de chaque village jusqu'à une distance de 4 km à la ronde. Cet espace « virtuel » calculé couvre une superficie de 5849 km² sur les 11500 km² de la partie sénégalaise du bassin, soit 50,8% (compte tenu du nombre de villages et des imbrications entre espace protégé pour chaque village) (Carte 30). Malgré toutes ces mesures, les transhumants continuent à dilapider la richesse floristique dans la forêt lointaine et même dans cet espace « virtuel » (où l'exploitation est dite interdite).



Carte 30 : Espace virtuelle devant être conservé contre la coupe abusive de la transhumance

Annexe 7 : Données sur le placer d'or « Nyafa » dans le village de Dyabougou

Ouvert en 2010, le placer d'or « Nyafa » enregistre aujourd'hui près de 6000 personnes pour un village qui jadis ne comptait que 38 ménages pour une population de 274 (RGPH, 2002), Cette rapide croissance de la population s'explique en partie par des arrivées massives d'orpailleurs en provenance de Tenkoto, après un violent et non moins meurtrier incendie ayant rayé de la carte les trois quarts dudit village. Le site est un véritable pourvoyeur d'emplois et la main-d'œuvre est importante et très variée. On y retrouve plusieurs nationalités, avec une prédominance des Maliens, des Sénégalais et des Guinéens suivis de Mauritanien, de Bissau Guinéens, de Gambiens, de Burkinabés, de Ghanéens, des Nigériens, de Congolais (avec de faibles proportions).



Carte 31 : Situation et nationalités présentes sur le placer d'or Nyafa dans le village Dyabougou : la taille des flèches est proportionnelle aux nombre de personnes présentes sur le site.

A Dyabougou, les mineurs sont soumis durant de longues heures à des travaux souvent dangereux dans des mines primitives éparpillées dans la brousse du village. Les prix élevés de l'or durant ces dernières années, y ont attiré un nombre croissant de « pauvres », des enfants y compris. Sur la mine, les coups de marteaux transforment les cailloux en poussière. Dyabougou, autrefois une petite localité, s'est transformée en un véritable village d'orpailleurs. A quelques kilomètres du village, des hommes et des adolescents descendent dans des puits de 3 à 9 mètres de profondeur, et d'autres remontent les pierres avec une poulie. Les orpailleurs se relaient à différentes tâches pour récupérer les miettes. Sur le site, on distingue facilement les acheteurs d'or (intermédiaires) des mineurs par leurs vêtements propres et leurs balances. Ils offrent tous le même prix pour un gramme d'or (environ 10 000 FCFA). Sur ce site, s'est aussi développé un commerce florissant où toute activité est rentable. Ainsi, drogue, alcool et sexe sont aussi au rendez-vous comme c'est le cas dans les 87 sites d'orpaillage traditionnel recensés dans la région de Kédougou, avec en premier plan Tenkoto, Massa-Massa et Bantako. La conséquence qui en découle se résume au grand banditisme qui s'y développe à pas de géant. Plusieurs pratiques illicites y sont recensées : des orpailleurs qui se promènent avec des armes blanches ; certains qui s'activent dans la vente et l'usage de drogues dures ; d'autres qui versent dangereusement dans l'alcool fabriqué sur place, et qui serait de très mauvaise qualité. De ce fait, très souvent, de vives altercations entre orpailleurs sont déplorées. Celles-ci sont amplifiées par la prostitution qui est bien représentée.

Annexe 8 : Données sur la gestion de l'eau : le Plan Directeur de l'Eau du bassin

➤ Le Plan Directeur de l'Eau du bassin de la Falémé

Le Plan Directeur de l'Eau est un outil de planification visant à déterminer et à hiérarchiser les interventions à réaliser dans un bassin pour atteindre les objectifs fixés de manière concertée par l'ensemble des acteurs de l'eau (MENV, 2004). Globalement, un PDE est formulé pour le bassin de la Falémé (à travers enjeux, orientations, objectifs et indicateurs).

- **L'analyse du bassin versant** qui constitue la première partie du Plan Directeur de l'Eau, comporte deux parties : le portrait du bassin versant et le diagnostic des ressources en eau. Le portrait du bassin de la Falémé est une description de son bassin et de tout ce qu'il renferme. Le diagnostic du bassin est défini comme étant une étude approfondie des problématiques liées à l'eau.

- **La détermination des enjeux** qui sont les préoccupations majeures ou les défis fondamentaux de gestion de l'eau à relever.

- **La détermination des orientations** qui sont les grandes priorités d'action qui seront privilégiées pour résoudre les problèmes relatifs aux enjeux.

- **La détermination des objectifs** qui sont les plus importants énoncés dans un cycle de GIEBV et qui doivent idéalement être chiffrés pour répondre aux enjeux du bassin.

- **La détermination des indicateurs** qui sont des mesures qui permettent de suivre les progrès accomplis ou l'efficacité des actions qui ont été réalisées dans le bassin afin d'atteindre les objectifs déterminés.

Partant des réalités sur le terrain, le Plan Directeur de l'Eau formulé pour le bassin versant de la Falémé (**Tableau 140**), est inspiré d'un ensemble de plans directeurs de bassins dans le monde. Il s'agit, entre autres, de celui de la rivière Saint-François¹¹², de la baie Missisquoi¹¹³, du bassin de la Kagera¹¹⁴, de la rivière Gatineau¹¹⁵, de la rivière Saint-Charles¹¹⁶, de la rivière Richelieu¹¹⁷ ... Ce plan correspond ainsi aux résultats et conclusions des différents documents consultés, et aux réalités du bassin.

L'élaboration du PDE a comporté plusieurs incertitudes qui sont liées à l'indisponibilité de certaines données et informations indispensables, mais également à la compréhension des processus environnementaux. Elaborer un PDE revient donc à apprendre à composer avec les incertitudes (Gangbazo G., 2004¹¹⁸). C'est pourquoi, il est recommandé d'utiliser une approche itérative. Autrement dit, il se peut que plusieurs générations de PDE soient nécessaires pour obtenir le résultat escompté.

A la lumière des résultats de suivi, il importe de réviser le plan d'action pour y apporter les corrections nécessaires, ce qui se fait dans le cadre d'un autre cycle de gestion intégrée de l'eau par bassin versant¹¹⁹. Un PDE bien formulé permet de retrouver le plus rapidement possible une qualité de l'eau satisfaisante et de protéger la ressource en eau pour les générations futures afin de sécuriser les usages d'eau potable et les activités aquatiques, de protéger la santé publique et celle des écosystèmes aquatiques, d'assurer une bonne qualité de vie aux usagers (agriculteurs, éleveurs, pêcheurs, orpailleurs, touristes...). Sa vision est de donner une eau plus saine pour préserver la bonne qualité de vie dans le bassin à travers la formule suivante : « *une eau saine pour la qualité de vie* ».

Le PDE de la Falémé est un premier pas vers l'amélioration de la qualité de l'eau, des milieux aquatiques et de l'environnement, et permet les différents usages de l'eau essentiels à la vie. Il est donc considéré comme un document ouvert et son élaboration comme un processus en évolution.

¹¹² COGESAF, 2010. Enjeux et orientations, objectifs et indicateurs du Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Saint-François. 8 p.

¹¹³ D'Auteuil C., 2011 : Le plan d'action du bassin de la Baie Missisquoi, Organisme de bassin versant de la baie Missisquoi, document 1, 69 p

¹¹⁴ KAGERA PGTA non daté: Suivi et évaluation, Programme de gestion transfrontalière des agroécosystèmes du bassin de la Kagera (PGTA Kagera), 36 p, www.fao.org/fileadmin/templates/nr/.../F_Kagera_French_.pdf

¹¹⁵ L'Agence de bassin versant des 7, 2010 : Plan Directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Gatineau, plan directeur de l'eau 2010-2015, Quebec, 282 p.

¹¹⁶ Anonyme : Plan directeur de l'eau – Bassin versant de la rivière Saint-Charles – Enjeux, orientations et objectifs, 9 p

¹¹⁷ Comité de concertation et de valorisation de la rivière Richelieu, 2011 : Plan directeur de l'eau – Plan d'action 2011-2014 du bassin versant de la rivière Richelieu. COVABAR, Beloeil., 32 p

¹¹⁸ Gangbazo G., 2004 : Elaboration d'un plan directeur de l'eau : guide à l'intention des organismes de bassins versants, Envirodoq : ENV/2004/0258, Ministère de l'Environnement, 82 pp.

¹¹⁹ Corporation du Bassin de la Jacques-Cartier 4755, route 1 Fossambault, Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (Qc) G3N 1T7 Qu'est-ce qu'un PDE? 18 mai 2011, consulté le 19 mai 2011.

Tableau 140 : Plan Directeur de l'Eau du bassin de la Falémé (enjeux, orientation, objectifs et indicateurs)

Enjeux	Orientations	Objectifs généraux	Objectifs spécifiques	Indicateurs
Enjeu A. Qualité de l'eau pour la santé humaine <i>(Assurer la santé de la population par un approvisionnement en eau de qualité et en quantité suffisante répondant aux besoins des usagers)</i>	A.1- Connaître la qualité de l'eau de consommation des utilisateurs du bassin versant de la Falémé.	A.1.1- Évaluer la qualité de l'eau de consommation des utilisateurs du bassin de la Falémé non desservis en AEP.	A.1.1.1- Procéder à l'analyse des sources d'approvisionnement en eau des différents utilisateurs du bassin de la Falémé.	A.1.1.1- Nombre de sources d'approvisionnement en eau dans le bassin ayant connu des analyses et étant protégés.
	A.2- Diminuer l'impact de la présence d'épidémies et d'organismes pathogènes (bilharziose intestinale et urinaire, paludisme et diarrhée) sur la santé de la population.	A.2.1- Diminuer les risques à la santé de la population associés à la présence d'organismes pathogènes aux lieux d'usages. A.2.2- Réduire les risques associés à la présence d'épidémies sur la santé de la population.	A.2.1.1- Mener des campagnes d'éducation, de sensibilisation et d'information sur les usagers de l'eau de la Falémé aux risques associés à la présence d'organismes pathogènes dans tout le bassin. A.2.2.1- Renforcer les capacités humaines, matérielles et techniques des structures impliquées dans le suivi de la qualité de l'eau potable.	A.2.1.2.1- Nombre d'usagers de l'eau sensibilisés. A.2.2.2.1- Nombre de structures de suivi de la qualité de l'eau potable.
Enjeu B. Eau, écosystème aquatique et milieux naturels <i>(protéger les écosystèmes aquatiques et préserver les usagers par une amélioration de la qualité de l'eau)</i>	B.1- Protéger et aménager les rives pour diminuer l'impact des dépôts de sédiments, de matières en suspension, de l'ensablement, de la désertification, de la dénaturalisation et de l'érosion sur la qualité des écosystèmes aquatiques.	B.1.1- Atteindre, en tout temps, une concentration faible voire acceptable de matières en suspension en rapport à la concentration naturelle du cours d'eau.	B.1.1.1- Réduire la concentration moyenne annuelle de matières en suspension dans le cours d'eau de la Falémé.	B.1.1.1.1- Taux de concentration de matières en suspension et de dépôts de sédiments.
		B.1.2- Avoir atteint un taux élevé de végétalisation des bandes riveraines et assurer la protection et la mise en valeur des milieux naturels dans le bassin de la Falémé.	B.1.2.1- Végétaliser de façon permanente une bonne partie des rives du bassin de la rivière Falémé et assurer la protection des milieux naturels.	B.1.2.1.1- Pourcentage de bandes riveraines végétalisées ; inventaire des boisés, des milieux humides, des bandes riveraines.
	B.1- Protéger et aménager les rives pour diminuer l'impact des dépôts de sédiments, de matières en suspension, de l'ensablement, de la désertification, de la dénaturalisation et de l'érosion sur la qualité des écosystèmes aquatiques.	B.2.1- Assurer qu'un certain pourcentage du bassin versant soit en milieu naturel protégé et atteindre une cote d'indice d'intégrité biotique excellente.	B.2.1.1- Se donner les moyens d'assurer la protection de la valeur écologique de l'ensemble des milieux humides. B.2.1.2- Atteindre une cote d'indice d'intégrité biotique "bonne" dans le bassin de la Falémé.	B.2.1.1.1- Nombre de milieux humides dont la valeur écologique est préservée. B.2.1.2.1- Cote de l'indice d'intégrité biotique.
		B.2.2- Protéger, conserver et restaurer la diversité des milieux humides, aquatiques et riverains.	B.2.2.1- Protéger les habitats fauniques et floristiques des espèces menacées et préoccupantes ; favoriser la préservation des milieux humides.	B.2.2.1.1- Nombre de milieux humides, aquatiques et riverains conservés.
		B.2.3- Assurer la protection et l'amélioration de l'habitat de poisson dans le bassin de la Falémé.	B.2.3.1- Conserver et restaurer des espaces boisés et bandes riveraines en bordure des plans d'eau, améliorer l'habitat, instaurer le repos biologique.	B.2.3.1.1- Superficie maximum inondée ; nombre de pêcheurs sensibilisés.
Enjeu C. Sécurité des populations et risques d'abondance, de pénurie et de pollution <i>(Anticiper les situations de crise : inondation, sécheresse et pollution)</i>	C.1- Améliorer la sécurité des résidents du bassin versant face aux risques d'inondations.	C.1.1- Eliminer les risques à la sécurité des usagers associés aux inondations et prévenir les problématiques engendrées lors des crues.	C.1.1.1- Développer un plan de gestion de risque accrue annuelle ; diminuer le nombre d'habitations et de champs inondés lors des crues exceptionnelles de saison pluvieuse.	C.1.1.1.1- Nombre de personnes sensibilisées pour réagir en cas de sinistre ; nombre de maisons et de champs inondés.
	C.2- Diminuer les aléas de tarissement sur les activités des résidents du bassin versant.	C.2.1- Faire disparaître les risques des usagers associés au tarissement du cours d'eau sur leurs activités.	C.2.1.1- Diminuer le nombre d'usagers victimes des étiages exceptionnelles de saison non pluvieuse.	C.2.1.1.1- Nombre de tronçons taris ; Nombre d'usages de l'eau connaissant un arrêt dans son déroulement.
	C.3- Connaître et réduire les charges de polluants provenant de sources ponctuelles et diffuses.	C.3.1 Améliorer la gestion des sites contaminés et diminuer l'apport d'intrants néfastes dans le milieu.	C.3.1.1- Diminuer le nombre d'usagers victimes de la pollution des charges de contaminants issues des sources ponctuelles et diffuses.	C.3.1.1.1- Nombre de sites gérés ; nombre de personnes sensibilisées ; nombre de personnes touchées.
Enjeu D. Usages agricoles, miniers, et récréotouristiques <i>(Renforcer, développer et pérenniser les politiques de gestion locale, Favoriser un financement ambitieux et équilibré)</i>	D.1- Atténuer la vulnérabilité des systèmes de production agricoles des populations du bassin.	D.1.1- Diversifier les systèmes de production agricoles et identifier des pratiques adaptées à la gestion locale.	D.1.1.1- Identifier et vulgariser une saine gestion de pratiques et techniques agro-environnementales favorables à la conservation des sols et de l'eau.	D.1.1.1.1- Expansion de l'agriculture avec une maîtrise de l'eau (irrigation et décrue améliorée).
	D.2- Soutenir les initiatives liées à l'exploitation minière dans une optique de développement durable.	D.2.1- Avoir atteint une cohabitation harmonieuse entre les écosystèmes aquatiques et floristiques, et les usages miniers.	D.2.1.1- Harmoniser l'utilisation de l'eau de la Falémé et du milieu pour la pratique d'activités minières dans une optique de développement durable.	D.2.1.1.1- Nombre de sites d'exploitation industrielle et de placers d'orpaillage dans le bassin.
	D.3- Développer une stratégie de mise en valeur du potentiel récréotouristique associé à l'eau et à l'environnement du bassin.	D.3.1- Inventorier les ressources fauniques accessibles aux utilisateurs et assurer la qualité de l'eau pour les activités nautiques.	D.3.1.1- Favoriser l'accessibilité à la Falémé pour la pratique d'activités récréotouristiques dans une optique de développement durable.	D.3.1.1.1- Nombre de sites touristiques aménagés ; Règles de bonne conduite pour protéger l'écosystème aquatique.
		D.3.2- Développer des activités récréotouristiques et valoriser le patrimoine naturel associé à l'eau.	D.3.2.1- Valoriser le potentiel patrimonial et touristique ; consolider et diversifier les sites et les activités récréotouristiques. en lien avec l'eau.	D.3.2.1.1- Pourcentage de valorisation du potentiel patrimonial et touristique.

➤ La gestion quantitative des ressources en eau du bassin de la Falémé

L'expérimentation de la gestion quantitative de l'eau du bassin de la Falémé est une phase incontournable dans la gestion de ses eaux. Le mode de gestion à préconiser consiste à répartir équitablement, en fonction des disponibilités, une offre en eau en définissant des règles d'accès entre les différents usages. Avec le tarissement de certains tronçons de la Falémé, un seuil d'alerte doit être fixé à travers un plan de gestion des étiages qui s'appuie sur des indicateurs de débits objectifs d'étiage (DOE) et de débits de crise (DCR). A l'image du fleuve Sénégal dans le cadre de la gestion du barrage de Manantali (Lamagat J. P. *et al*¹²⁰), le plan de gestion des étiages dans le bassin de la Falémé ne pourrait être envisagé qu'avec la construction du barrage de Gourbassi. Le débit objectif d'étiage (DOE) est la valeur de débit fixée par le SDAGE¹²¹ au-dessus de laquelle sont assurés la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique et le débit de crise (DCR) qui est la valeur de débit au-dessous de laquelle sont mises en péril l'alimentation en eau potable et la survie des espèces présentes dans le milieu. Les valeurs d'un débit objectif ou de crise doivent être choisies avec attention car elles peuvent présenter des avantages/désavantages pour le développement et la préservation du milieu. Une valeur élevée de débit entraîne des défaillances plus fréquentes et des contraintes plus importantes pour les usages, mais le milieu naturel est lui mieux préservé. Ces débits sont parfois critiqués, non pas en tant que notion pertinente à prendre en compte pour la gestion des ressources en eau, mais plutôt en termes de fiabilité des seuils de référence choisis. En effet, leur définition n'est pas basée sur une méthode unique : par exemple, pour le DOE, plusieurs méthodes de calcul sont données dans le **Tableau 141**.

Tableau 141 : Méthodes de calcul et estimations du DOE dans le bassin de la Falémé (Source : Fabien Christian, 2008)

Méthodes	Valeurs en m ³ /s (1954-2008)		
	Fadougou	Gourbassi	Kidira
- Le débit mensuel le plus bas sur une année de fréquence quinquennale (QMNA5). Le QMNA5 est à l'origine des premières valeurs de DOE,	2,27	1,63	2,67
- La valeur correspondant à la moyenne des débits les plus bas pendant 30 jours consécutifs (VCN30),	0,93	0,20	0,26
- La valeur correspondant au 10 % du module des cours d'eau correspondant au plancher de la Loi Pêche. Le module est la moyenne interannuelle des débits journaliers,	7,64	10,2	12,4
- La valeur correspondant à la moyenne des débits les plus bas pendant 10 jours consécutifs (VCN10).	0,74	0,16	0,22

On comprend aisément qu'un DOE fixé à partir d'un VCN30 est supérieur à un DOE fixé à partir d'un VCN10. Ainsi il est donc bien plus contraignant pour les usages et plus protecteur pour l'écosystème du bassin de la Falémé, que le DOE fixé à partir du VCN10.

➤ Des solutions aux problèmes de gestion des ressources en eau au Sénégal

Tableau 142 : Solutions aux problèmes de gestion des eaux au Sénégal (Source : DGPRES, 2007)

Objectifs	Résultats attendus
Objectif Global : Renforcer les moyens de gestion et réformer les cadres institutionnel, légal, et organisationnel en vue d'améliorer la protection, la gestion technique, économique et financière des ressources en eau en impliquant tous les acteurs	
Objectif spécifique 1 : Améliorer les connaissances et les moyens de gestion des ressources en eau	Les connaissances sur l'état des ressources en eau, les disponibilités et les besoins sont améliorées et diffusées
	Des moyens techniques et humains suffisants sont déployés pour rendre efficace la gestion de l'eau
	Des ressources financières sont garanties pour la mobilisation, l'exploitation, et la protection des ressources en eau
	La performance des systèmes de protection, de prévention et de gestion des risques liés à l'eau est améliorée
Objectif spécifique 2 : Créer un environnement favorable à l'application de la GIRE par des réformes légales, organisationnelles et politiques	Les textes législatifs et réglementaires sont révisés à la faveur de la GIRE et opérationnalisés
	Des mécanismes de coordination efficace sont développés pour une efficacité de la gestion des ressources en eau et accroître la participation effective de tous les acteurs aux processus de prise de décision et de gestion.
	Meilleure application de la GIRE dans les instruments politiques sectoriels et de développement.
Objectif spécifique 3 : Améliorer la communication, l'information, l'éducation et la sensibilisation sur l'eau	Les acteurs sont sensibilisés sur les défis liés à l'eau.
	La conscience des jeunes sur l'eau est renforcée à travers des programmes d'éducation améliorés

¹²⁰ Lamagat J. P.* et Bader J. C. **: Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs.

*IRD Dakar Sénégal **IRD Montpellier, France

¹²¹ SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

Annexe 9 : Données sur la qualité des eaux du bassin de la Falémé

La qualité physico-chimique des cours d'eau à l'échelle du bassin versant est évaluée *via* les mesures empruntées à Tropica Environnemental Consultants, 2008 (**Tableau 143**) par faute de données. Les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines dans des zones du bassin versant de la Falémé montrent que les eaux (superficielles et souterraines) n'ont pas les mêmes caractéristiques. Cependant, elles sont moyennement minéralisées, même si on note sur la plupart des puits des teneurs en chlorures et en sodium dépassant les valeurs limites. Il en est de même pour les teneurs en nitrates observées sur les puits avec des valeurs légèrement supérieures à la norme. La présence de nitrates dans les échantillons d'eau des puits villageois est éventuellement due à une contamination par les activités anthropiques (agriculture, orpaillage...).

Tableau 143 : Résultats des analyses chimiques des eaux de surface et souterraines (Source : Tropica Environnemental Consultants, 2008)

N°	OUVRAGES	Coordonnées (degré)		PARAMETRES PHYSIQUES					CATIONS EN %			ANIONS EN %		
		Long O	Lat N	T (°C)	pH	C.E.(QS/cm)	TDS (mg/l)	DT(°F)	Na+ +K+	Ca2+	Mg2+	HCO3-	Cl- +NO3-	SO42-
1	Bransan Forage	-12,1	13,3	30,1	6,17	196	149	6,2	36,3	47,4	16,3	88,4	10,9	0,79
2	Bransan Puits	-12,1	13,3	26,2	6,24	221	168	7,1	34,1	53,7	12,2	80,7	11,5	7,84
3	Rivière Falémé	-11,9	13,4	28	7,23	66	75	2,8	18,7	73,9	7,42	73,9	23,5	2,68
4	Soukounkou Campement (Forage)	-11,9	13,4	31	6,91	774	590	29,2	18,8	42,2	39	84,5	9,34	6,12
5	Soukounkou Village (Forage)	-11,9	13,4	32,2	7,02	1192	908	25,8	55,3	18,3	26,4	72,1	19,6	8,27
6	Dialakotoba (Forage)	-12	13,3	30,3	6,45	703	535	26,8	21,8	46,1	32,1	54,3	43,1	2,61
7	Dialakotoba (Puits)	-12	13,4	25,8	6,39	716	546	22,4	33,6	49,7	16,7	37,3	58,4	4,31
8	Falomba (Forage)	-12,1	13,2	29,8	6,25	237	180	8	24,5	51,9	23,7	90,1	9,2	0,75
9	Makhana (Forage)	-12,1	13,1	29,8	6,69	983	748	38,8	17,5	28,9	53,6	52,7	38,5	8,81
10	Médina Sabodala (Forage)	12,1	13,1	29,9	6,85	605	461	26,4	13,6	61,8	24,6	80,3	11,4	8,38
11	Sabodala village (Forage)	-12,1	13,2	30,2	6,96	463	352	20	6,56	47,1	46,3	92,5	7,24	0,29
12	Dambankhoba (Puits)	-12,1	13,2	24,3	6,17	225	171	6,7	37,1	53,8	9,1	90,9	8,42	0,7
13	Barrage 1	-12,1	13,2	20,2	6,8	98	107	3,5	29	60,9	10,1	83	16,1	0,89
14	Barrage 2	-12,2	13,2	21,7	7,01	224	170	10	7,07	55,8	37,1	89,8	9,55	0,63

➤ Les paramètres physiques (in situ)

Les résultats des analyses chimiques classiques des eaux de surface et souterraines dans la zone du bassin de la Falémé (**Tableau 143**), présentent une nette variabilité de la minéralisation de la nappe en fonction des puits. En définitive, les valeurs de la minéralisation totale des eaux dans la zone de la Falémé varient de 75 à 909 mg/l, ce qui leur confère dans l'ensemble le caractère d'eau douce (TDS < 1000 mg/l).

➤ Les faciès géochimiques des eaux

Le calcul des pourcentages relatifs cationiques et anioniques des ions analysés montre que les cations dominants sont le calcium, le magnésium, les anions dominants et les bicarbonates (**Tableau 143**). Les teneurs en nitrates élevées au niveau de certains ouvrages proviennent très probablement d'une pollution très localisée de ces ouvrages par les activités humaines. Les résultats de projection sur un diagramme de Piper montrent globalement que pour les cations, les eaux des différents puits se regroupent essentiellement en deux familles : les eaux calciques et les eaux présentant un faciès mixte. Pour les anions, les eaux bicarbonatées sont dominantes.

➤ La potabilité des eaux

En comparant des résultats des analyses chimiques des eaux de ces nappes aux normes de potabilité usuelles en vigueur au Sénégal, on se rend compte de la potabilité des eaux souterraines de la nappe superficielle et profonde notamment pour un bon nombre de paramètres (Mg2+, Ca2+, Na+ et SO4). Néanmoins, la bonne potabilité des eaux est limitée par les teneurs élevées en nitrates et fer dans certains puits, avec souvent des valeurs qui peuvent dépasser la norme qui leur est admissible. En plus, un nombre non négligeable des éléments physico-chimiques mesurés gardent des valeurs moyennes et minimales en dessous de la limite de qualité des eaux potables (normes OMS et sénégalaise).

Annexe 10 : Annexes photographiques du bassin de la Falémé



Photo 7 : Structure de l'habitant dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, avril 2010 et avril 2011)



Photo 8 : Catégories de sols dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009)



Photo 9 : Dégradation de l'environnement dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)



Photo 10 : Stations hydrométriques dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et décembre 2010)



Photo 11 : Moyens de transport dans le bassin de la Falémé (cliché de Faye C, octobre 2009 et avril 2011)

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	A
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	2
AVANT-PROPOS	4
RESUME DE L'ETUDE.....	7
INTRODUCTION GENERALE.....	8
METHODOLOGIE DE L'ETUDE	15
PARTIE I : LE CADRE THEORIQUE DE LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU DANS UN BASSIN TRANSFRONTALIER.....	17
CHAPITRE I : L'ANALYSE CONCEPTUELLE.....	18
<i>I.1 Le concept d' « évaluation »</i>	<i>18</i>
<i>I.2 Le concept de « ressource »</i>	<i>19</i>
<i>I.3 Le concept de « gestion »</i>	<i>21</i>
<i>I.4 Le concept de « gestion des ressources en eau »</i>	<i>22</i>
<i>I.5 Le concept de « GIRE »</i>	<i>23</i>
<i>I.6 Le concept de « variabilité hydroclimatique »</i>	<i>24</i>
<i>I.7 Le concept de « modélisation »</i>	<i>25</i>
CHAPITRE II : L'ÉTAT DES RECHERCHES SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DE LA FALEME 27	
<i>II.1 L'état de la recherche sur le bassin de la Falémé</i>	<i>27</i>
<i>II.2 Sur la variabilité hydroclimatique</i>	<i>31</i>
<i>II.3 Sur l'utilisation des modèles hydrologiques</i>	<i>33</i>
CHAPITRE III : LES DONNÉES, LES OUTILS ET LES MÉTHODES DE L'ÉTUDE	36
<i>III.1 Les sources, la nature et la qualité des données.....</i>	<i>36</i>
III.1.1 Les données climatologiques : présentation, collecte et critique des données	36
III.1.2 Les données hydrométriques : présentation, collecte et critique des données.....	38
III.1.3 Les données provenant d'observations et d'enquêtes de terrain	39
<i>III.2 L'approche méthodologique</i>	<i>41</i>
III.2.1 La méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP)	41
III.2.2 L'analyse et la critique statistique des données hydroclimatiques	42
III.2.2.1 L'homogénéisation des données.....	42
III.2.2.2 Le comblement des lacunes par la régression linéaire.....	43
III.2.3 Les méthodes d'étude de la variabilité hydropluviométrique du bassin.....	45
III.2.4 Les méthodes d'évaluation des ressources en eau.....	47
III.2.4.1 Le calcul de la pluie moyenne du bassin	47
III.2.4.2 La détermination de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	47
III.2.5 La modélisation hydrologique de la relation pluie-débit.....	48
III.2.5.1 L'intérêt de l'application d'un modèle pluie-débit	48
III.2.5.2 La présentation et le fonctionnement du modèle GR2M	49
III.2.5.3 Les variables du modèle GR2M	51
III.2.5.4 La mise en œuvre du modèle GR2M	52
III.2.5.4.1 Le calage-contrôle et la validation.....	52
III.2.5.4.2 L'évaluation de la performance du modèle.....	53
III.2.6 Les méthodes d'étude d'un cycle de gestion intégrée de l'eau par bassin versant.....	55
PARTIE 2 : LA FALEME ET SON BASSIN	57
CHAPITRE IV : LE MILIEU ET LES FACTEURS STABLES DE L'ÉCOULEMENT	58
<i>IV.1 Le réseau hydrographique</i>	<i>58</i>
<i>IV.2 Les caractéristiques géologiques du bassin versant de la Falémé.....</i>	<i>61</i>
IV.2.1 Les unités géologiques affleurant dans le bassin.....	61
IV.2.1.1 Les formations birrimiennes du socle	61
IV.2.1.1 Les formations du Paléozoïque (Primaire)	62
IV.2.1.2 Les formations du Secondaire et du Tertiaire	64
IV.2.2 Les roches du bassin.....	64
IV.2.2.1 Les roches éruptives	66
IV.2.2.2 Les roches métamorphiques	66
IV.2.2.3 Les roches sédimentaires	66
<i>IV.3 Les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de la Falémé.....</i>	<i>67</i>
IV.3.1 Les grands traits de la géomorphologie.....	67

IV.3.2	Les caractéristiques de forme et le relief du bassin	68
IV.3.3	Le relief du bassin versant	70
IV.3.4	L'analyse statistique des données géomorphologiques (Application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)	74
IV.4	<i>Les caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant de la Falémé</i>	77
IV.5	<i>Les caractéristiques pédologiques et formations végétales du bassin de la Falémé</i>	80
IV.5.1	Les caractéristiques pédologiques du bassin	81
IV.5.2	Les formations végétales du bassin	83
CHAPITRE V	: LE CLIMAT DU BASSIN ET SA VARIABILITE	87
V.1	<i>Les mécanismes généraux du climat</i>	87
V.1.1	Les centres d'action.....	87
V.1.2	Les flux et discontinuités.....	89
V.1.3	La trace au sol de l'Equateur Météorologique.....	91
V.1.3.1	La zone non pluvieuse	91
V.1.3.2	La zone pluvieuse	91
V.2	<i>Les régimes pluviométriques dans le bassin</i>	92
V.2.1	La variabilité mensuelle de la pluie dans le bassin.....	94
V.2.1.1	Le régime pluviométrique guinéen.....	94
V.2.1.2	Le régime sud soudanien	96
V.2.1.3	Le régime nord soudanien	98
V.2.2	La variabilité annuelle de la pluie dans le bassin	102
V.2.2.1	Les indices du vecteur régional et leur variabilité	104
V.2.2.2	Les indices d'anomalie pluviométrique et leur variabilité.....	105
V.2.2.3	L'analyse de l'homogénéité des séries pluviométriques et déficits pluviométriques (test de rupture de Pettitt et procédure de segmentation).....	106
V.2.2.4	L'analyse fréquentielle de la pluviométrie annuelle.....	109
V.2.3	L'estimation de la pluie moyenne	110
V.3	<i>Les autres éléments du climat et leur variabilité dans le bassin</i>	111
V.3.1	Les vents.....	111
V.3.2	Les autres éléments du climat.....	116
V.4	<i>Les domaines climatiques dans le bassin</i>	122
CHAPITRE VI	: L'INFLUENCE DES FACTEURS SUR L'ECOULEMENT	127
VI.1	<i>Dans le haut bassin de la Falémé</i>	127
VI.2	<i>Dans les bassins moyen et inférieur</i>	129
VI.3	<i>Le bilan climatique de l'eau dans le bassin</i>	131
PARTIE 3	: L'ECOULEMENT ET SA VARIABILITE DANS LE BASSIN DE LA FALEME	134
CHAPITRE VII	: LE REGIME MOYEN ET SA VARIABILITE.....	135
VII.1	<i>Les régimes fluviaux tropicaux dans le bassin de la Falémé</i>	135
VII.1.1	Le régime fluvial tropical de transition et sa variabilité dans le bassin de la Falémé	136
VII.1.1.1	Le régime moyen	136
VII.1.1.2	La variabilité du régime moyen.....	138
VII.1.1.3	L'écoulement journalier.....	139
VII.1.1.3.1	L'année moyenne.....	140
VII.1.1.3.2	L'année du débit moyen le plus élevé.....	141
VII.1.1.3.3	L'année du débit moyen le plus faible.....	142
VII.1.2	Le régime fluvial tropical pur et sa variabilité dans le bassin de la Falémé.....	143
VII.1.2.1	Le régime moyen	143
VII.1.2.2	La variabilité du régime moyen	146
VII.1.2.3	L'écoulement journalier.....	148
VII.1.2.3.1	L'année moyenne.....	149
VII.1.2.3.2	L'année du débit moyen le plus élevé.....	150
VII.1.2.3.3	L'année du débit moyen le plus faible.....	151
VII.2	<i>L'analyse de l'écoulement extrême dans le bassin</i>	152
VII.2.1	Les crues.....	152
VII.2.1.1	Les crues en régime fluvial tropical de transition.....	153
VII.2.1.1.1	La crue moyenne.....	153
VII.2.1.1.2	La crue de l'année du débit moyen le plus élevé	156
VII.2.1.1.3	La crue de l'année du débit moyen le plus faible	156
VII.2.1.2	Les crues en régime fluvial tropical pur	157
VII.2.1.2.1	La crue moyenne.....	157

VII.2.1.2.2	La crue de l'année du débit moyen le plus élevé	160
VII.2.1.2.3	La crue de l'année du débit moyen le plus faible	161
VII.2.2	Les étiages	162
VII.2.2.1	Les étiages en régime fluvial tropical de transition	163
VII.2.2.2	Les étiages en régime fluvial tropical pur	164
VII.3	<i>L'analyse du tarissement dans le bassin</i>	167
VII.3.1	Les tarissements en régime fluvial tropical de transition	169
VII.3.1.1	Le tarissement moyen	169
VII.3.1.2	Le tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé	171
VII.3.1.3	Le tarissement de l'année du débit moyen le plus faible	172
VII.3.2	Le tarissement en régime fluvial tropical pur	172
VII.3.2.1	Le tarissement moyen	172
VII.3.2.2	Le tarissement de l'année du débit moyen le plus élevé	175
VII.3.2.3	Le tarissement de l'année du débit moyen le plus faible	175
CHAPITRE VIII	: LE BILAN DE L'ÉCOULEMENT ET LES DISPONIBILITES EN EAU	179
VIII.1	<i>Le bilan de l'eau dans le régime fluvial tropical de transition</i>	180
VIII.1.1	Le bilan moyen	180
VIII.1.2	Le bilan en année du débit moyen le plus élevé	181
VIII.1.3	Le bilan en année du débit moyen le plus faible	182
VIII.2	<i>Le bilan de l'eau dans le régime fluvial tropical pur du bassin</i>	182
VIII.2.1	Le bilan moyen	182
VIII.2.2	Le bilan en année du débit moyen le plus élevé	184
VIII.2.3	Le bilan en année du débit moyen le plus faible	186
CHAPITRE IX	: UNE CONTRIBUTION DU MODELE GR2M A L'ETUDE DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN	188
IX.1	<i>Les données utilisées dans la modélisation</i>	188
IX.2	<i>La critique de données</i>	191
IX.3	<i>Les méthodes de découpage et le choix des périodes de Calage/Validation</i>	192
IX.4	<i>Les performances du modèle GR2M</i>	193
IX.5	<i>Les débits moyens simulés en phase de calage et de validation</i>	197
IX.6	<i>La robustesse du modèle GR2M</i>	199
IX.7	<i>Les paramètres du modèle GR2M</i>	202
PARTIE 4	: L'ESPACE ET LA SOCIETE : GESTION DES EAUX DU BASSIN DE LA FALEME	205
CHAPITRE X	: LE MILIEU ET LES HOMMES	206
X.1	<i>La partie sénégalaise du bassin de la Falémé</i>	206
X.2	<i>Les caractéristiques d'une population en pleine croissance</i>	208
CHAPITRE XI	: LES RESSOURCES EN EAU ET L'ECONOMIE RURALE	215
XI.1	<i>Une pluviométrie déficitaire</i>	215
XI.2	<i>Des eaux de surface, support de nombreux usages</i>	215
XI.3	<i>Des eaux souterraines fortement sollicitées</i>	219
XI.4	<i>L'eau et les activités de production</i>	221
XI.4.1	Une agriculture traditionnelle en dépit d'énormes potentialités	222
XI.4.2	Un élevage traditionnel dans une zone à potentialités importantes	226
XI.4.3	La pêche, une activité entièrement dépendante de la Falémé	229
XI.4.4	Une exploitation minière à la fois industrielle et artisanale	229
XI.4.5	Les autres activités de production	233
XI.5	<i>L'impact des usages sur les ressources en eau</i>	235
CHAPITRE XII	: LA GESTION ET L'AMENAGEMENT INTEGRES DES RESSOURCES EN EAU	239
XII.1	<i>L'état de la gestion de l'eau dans le bassin et ses contraintes</i>	239
XII.2	<i>L'OMVS, un organisme de bassin pour la gestion de la Falémé</i>	242
XII.2.1	L'historique de la mise en place d'une structure de gestion des eaux du bassin	243
XII.2.2	L'OMVS et la gestion des eaux du bassin de la Falémé	244
XII.3	<i>Le fonctionnement hydrologique du système du bassin de la Falémé</i>	246
XII.4	<i>Le système de gestion intégrée des ressources en eau du bassin de la Falémé</i>	249
XII.5	<i>La planification d'un cycle de gestion intégrée de l'eau du bassin de la Falémé</i>	254
XII.5.1	Un diagnostic du bassin de la Falémé	254
XII.5.2	Des hypothèses de solutions aux problèmes identifiés dans le bassin	257
XII.5.3	Quelques préoccupations majeures de gestion de l'eau dans le bassin	259
CONCLUSION GENERALE	261
BIBLIOGRAPHIE	263

TABLE DES ILLUSTRATIONS	275
LISTE DES FIGURES DANS LE TEXTE	275
LISTE DES TABLEAUX DANS LE TEXTE.....	276
LISTE DES CARTES DANS LE TEXTE.....	279
LISTE DES PHOTOS DANS LE TEXTE	279
LISTE DES ANNEXES DE DONNEES.....	280
ANNEXE 1 : QUESTIONNAIRE ET GUIDE D'ENTRETIEN.....	281
ANNEXE 2 : METHODE D'ECHANTILLONNAGE UTILISEE	285
ANNEXE 3 : DONNEES SUR LES PLUIES ET LES DEBITS	286
ANNEXE 4 : DONNEES SUR LA MODELISATION : L'EFFET DE LA PERIODE SUR LE CALAGE.....	288
ANNEXE 5 : DONNEES SUR LE MILIEU ET LES HOMMES.....	290
ANNEXE 6 : DONNEES SUR LES RESSOURCES NATURELLES ET L'ECONOMIE RURALE.....	294
ANNEXE 7 : DONNEES SUR LE PLACER D'OR « NYAFA » DANS LE VILLAGE DE DYABOUGOU.....	300
ANNEXE 8 : DONNEES SUR LA GESTION DE L'EAU : LE PLAN DIRECTEUR DE L'EAU DU BASSIN	301
ANNEXE 9 : DONNEES SUR LA QUALITE DES EAUX DU BASSIN DE LA FALEME	304
ANNEXE 10 : ANNEXES PHOTOGRAPHIQUES DU BASSIN DE LA FALEME	305
TABLE DES MATIERES	306