



OMVS
ORGANISATION POUR
LA MISE EN VALEUR
DU FLEUVE SÉNÉGAL

HAUT COMMISSARIAT DE L'OMVS

PROJET DE GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU ET DE DÉVELOPPEMENT DES USAGES MULTIPLES DANS LE BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL (PGIRE)

ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET D'AVANT-PROJET SOMMAIRE (APS) DE L'AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE GOURBASSI



RAPPORT DES ETUDES HYDROTECHNIQUES (VERSION PROVISOIRE)

Mai 2011



**SNC•LAVALIN
International**

020857-3000-40ER-0001-PA

**PROJET DE GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN
EAU ET DE DÉVELOPPEMENT DES USAGES MULTIPLES
DANS LE BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL (PGIRE)**

**ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET D'AVANT-PROJET
SOMMAIRE (APS) DE L'AMÉNAGEMENT
HYDROÉLECTRIQUE DE GOURBASSI**

**RAPPORT DES ETUDES HYDROTECHNIQUES
(VERSION PROVISOIRE)**

Mai 2011

Préparé par : Marc PAYETTE, Etienne PERRATON

Vérifié par : Michel TREMBLAY, Thierry TURQ

Approuvé par : Ramy K. LOUIS

Le présent rapport est la version provisoire du rapport des études hydrotechniques (hydrologie et régulation).

Dans ce rapport, le mot « Client » fait référence au Haut Commissariat de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) et « consultant » fait référence à SNC-Lavalin International Inc. (SLII) ; le terme « étude » fait référence à l'étude de faisabilité et d'avant-projet sommaire (APS) de l'aménagement hydroélectrique de Gourbassi alors que le terme « projet » fait référence au projet d'aménagement hydroélectrique de Gourbassi.

AVIS AU LECTEUR

Ce document fait état de l'opinion professionnelle de SNC-Lavalin International Inc. quant aux sujets qui y sont abordés. Elle a été formulée en se basant sur ses compétences professionnelles en la matière et avec les précautions qui s'imposent. Le document doit être interprété dans le contexte du contrat en date du 4 mars 2010 (le « Contrat ») intervenu entre le Haut Commissariat de l'OMVS (le « Client ») et SNC-Lavalin International Inc., ainsi que de la méthodologie, des procédures et des techniques utilisées, des hypothèses de SNC-Lavalin International Inc. ainsi que des circonstances et des contraintes qui ont prévalu lors de l'exécution de ce mandat. Ce document n'a pour raison d'être que l'objectif défini dans le Contrat, et est au seul usage du Client, dont les recours sont limités à ceux prévus dans le Contrat. Il doit être lu comme un tout, à savoir qu'une portion ou un extrait isolé ne peut être pris hors contexte.

SNC-Lavalin International Inc. ayant, pour évaluer les coûts et autres valeurs estimées, le cas échéant, suivi une méthode et des procédures et pris les précautions appropriées au degré d'exactitude visé, en se basant sur ses compétences professionnelles en la matière et avec les précautions qui s'imposent, est d'opinion qu'il y a une forte probabilité que les coûts réels et valeurs estimées se situent dans la marge d'erreur indiquée. Cependant, l'exactitude de ces estimations ne peut être garantie. À moins d'indication contraire expresse, SNC-Lavalin International Inc. n'a pas contre-vérifié les hypothèses, données et renseignements en provenance d'autres sources (dont le Client, les autres consultants, laboratoires d'essai, fournisseurs d'équipements, etc.) et sur lesquelles est fondée son opinion. SNC-Lavalin International Inc. n'en assume nullement l'exactitude et décline toute responsabilité à leur égard.

Dans la mesure permise par la loi, SNC-Lavalin International Inc. décline en outre toute responsabilité envers le Client et les tiers en ce qui a trait à l'utilisation (publication, renvoi, référence, citation ou diffusion) de tout ou partie du présent document, ainsi que toute décision prise ou action entreprise sur la foi dudit document.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
1. INTRODUCTION	1.1
1.1 Préambule	1.1
1.2 Résumé des études et reconnaissances précédentes	1.1
1.3 Objectifs et portée des études hydrotechniques actuelles	1.2
1.3.1 Objectifs des études	1.2
1.3.2 Portée des études	1.2
2. DONNÉES DE BASE	2.1
2.1 Situation générale	2.1
2.1.1 Localisation et accès principaux	2.1
2.1.2 Configuration générale du site de Gourbassi	2.1
2.2 Caractéristiques physiques	2.2
2.2.1 Caractéristiques générales du bassin du fleuve Sénégal	2.2
2.2.2 La rivière Falémé	2.12
2.3 Données de base topographiques	2.13
2.3.1 Rappel des données topographiques disponibles en début d'étude	2.13
2.3.2 Éléments topographiques au 1:20 000 ^e du bassin de retenue	2.15
2.4 Données climatiques	2.16
2.5 Données hydrométéorologiques	2.18
2.5.1 Données sur les précipitations	2.18
2.5.2 Données existantes sur les débits	2.20
2.6 Données sur les apports solides	2.23
3. MISE À JOUR DES DONNÉES HYDROLOGIQUES	3.1
3.1 Série d'apports naturels	3.1
3.2 Impact des changements climatiques	3.3
3.2.1 Impact sur les précipitations	3.3
3.2.2 Impact sur l'écoulement	3.4
3.3 Mise à jour des besoins en eau	3.5
3.3.1 La zone d'étude	3.5
3.3.2 Considérations pour le calcul des besoins en eau pour l'agriculture	3.6
3.3.3 Situation actuelle des superficies irriguées	3.8
3.3.4 Superficie potentielle en irrigation	3.14
3.3.5 Cultures de décrue	3.17
3.3.6 La mouille de Balou-Djimbé	3.20
3.3.7 L'élevage	3.21
3.3.8 Résumé des calculs des besoins en eau de l'agriculture	3.25
3.3.9 Les besoins en eau des industries minières	3.30
3.3.10 La navigation commerciale	3.31
4. ÉTUDES HYDROTECHNIQUES	4.1
4.1 Étude des pluies	4.1
4.1.1 Relation intensité-durée-fréquence	4.4
4.2 Étude des crues	4.5
4.2.1 Analyse de fréquence des crues	4.5
4.2.2 Laminage des crues	4.7

4.2.3	Coefficient de ruissellement _____	4.9
4.2.4	Pluie maximale probable _____	4.9
4.2.5	Crue maximale probable _____	4.9
4.3	Étude de l'évaporation nette à Gourbassi _____	4.10
4.3.1	Comparaison de l'évaporation à Gourbassi avec celle de Manantali _____	4.11
4.4	Étude de transport de sédiments _____	4.12
4.4.1	Données de base _____	4.12
4.4.2	Sédiments en rivière _____	4.13
4.4.3	Courbe de tarage de sédiments _____	4.13
4.4.4	Courbes d'emmagasinement du réservoir _____	4.14
4.4.5	Méthodologie de l'étude de sédimentation _____	4.16
4.4.6	Étapes _____	4.16
4.4.7	Analyse des résultats _____	4.21
5.	RÉGULARISATION DES DÉBITS ET SIMULATION DU POTENTIEL DE PRODUCTION _____	5.1
5.1	Simulation de régularisation de la rivière Falémé et du fleuve Sénégal ____	5.1
5.1.1	Objectifs et contraintes de régularisation du réservoir de Gourbassi _____	5.2
5.1.2	Gestion actuelle du réservoir de Manantali _____	5.5
5.1.3	Principes, paramètres et méthodologie de régularisation avec Gourbassi _____	5.7
5.1.4	Simulations de gestion de Gourbassi _____	5.7
5.1.5	Synthèse des résultats _____	5.9
5.2	Optimisation du volume de la retenue et de la puissance installée _____	5.13
5.2.1	Méthodologie _____	5.13
5.2.2	Résultats _____	5.13
5.2.3	Effets du changement climatique sur le productible _____	5.17
5.2.4	Conclusion _____	5.17
6.	DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE _____	6.1

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A CARTES ET DESSINS

**ANNEXE B MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS DES CALCULS DES BESOINS EN
EAU POUR L'AGRICULTURE**

ANNEXE C RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES SIMULATIONS HYDRAULIQUES

ANNEXE D DOSSIER PHOTOGRAPHIQUE

LISTE DES TABLEAUX

	PAGE
Tableau 2-1 Liste des cartes topographiques générales disponibles	2.13
Tableau 2-2 Inventaire des données disponibles pour chaque station	2.17
Tableau 2-3 Inventaire des données météorologiques disponibles	2.18
Tableau 2-4 Inventaire des données pluviométriques disponibles.....	2.20
Tableau 2-5 Comparaison des mesures à Gourbassi aux stations voisines	2.21
Tableau 2-6 Mesures de charges solides réalisées à Gourbassi.....	2.24
Tableau 3-1 Série de débits mensuels de base de la Falémé à Gourbassi (en m ³ /s)	3.1
Tableau 3-2 Série de débits mensuels du fleuve Sénégal à Bakel (en m ³ /s)	3.2
Tableau 3-3 Projections pour l'Afrique de l'Ouest	3.4
Tableau 3-4 Variation du régime hydrologique selon les projections de changements climatiques.....	3.4
Tableau 3-5 Schémas des types d'exploitation agricole dans la Haute Vallée du fleuve Sénégal	3.8
Tableau 3-6 Comparaison des superficies historiques et assolement des cultures pluviales avec les superficies de 2010.....	3.10
Tableau 3-7 Surfaces des cultures pluviales et irriguées – Département de Bakel.....	3.11
Tableau 3-8 Sites aménagés dans la région de Kayes 2009-2010.....	3.12
Tableau 3-9 Principaux cours d'eau du Cercle de Kayes	3.13
Tableau 3-10 Sites potentiels pour cultures irriguées identifiés par la DRA	3.15
Tableau 3-11 Superficies potentielles prioritaires selon planification Malienne	3.17
Tableau 3-12 La mouille de Balou-Djimbé et son potentiel.....	3.20
Tableau 3-13 Évaluation des besoins en eau du cheptel s'abreuvant à la Falémé	3.25
Tableau 3-14 Assolements et superficies des cultures irriguées en hivernage – Hypothèse pour calculs des besoins en eau des cultures irriguées	3.27
Tableau 3-15 Assolements et superficies des cultures irriguées en contre-saison froide – Hypothèse pour calculs des besoins en eau des cultures irriguées.....	3.28
Tableau 3-16 Tableau récapitulatif des besoins en eau pour l'irrigation et le cheptel et évaluation des pertes par évaporation	3.29
Tableau 4-1 Pondérations des stations pour le calcul de la pluie centrée sur le bassin de Gourbassi	4.2
Tableau 4-2 Falémé à Gourbassi – Fréquence des crues	4.6
Tableau 4-3 Évaporation nette pour le réservoir de Gourbassi.....	4.11
Tableau 4-4 Classification des réservoirs.....	4.18

Tableau 4-5 Détermination directe de la profondeur du dépôt de sédiments au barrage	4.20
Tableau 5-1 Récapitulatif des besoins en eau sur la Falémé	5.4
Tableau 5-2 Récapitulatif de la demande en eau pour l'irrigation, les besoins domestiques et la navigation à Bakel	5.4
Tableau 5-3 Taux d'efficacité de la régularisation pour Manantali et Gourbassi	5.10
Tableau 5-4 Impact des aménagements sur le taux d'efficacité	5.10
Tableau 5-5 Effet de la cote de gestion maximale (marnage = 9 m et débit nominal = 90 m ³ /s)	5.14
Tableau 5-6 Effet du marnage (CG _{Max} = 94 m s.m. et débit nominal = 90 m ³ /s).....	5.15
Tableau 5-7 Effet de la puissance installée (CG _{Max} = 94 m s.m. et marnage = 9 m)	5.16
Tableau 5-8 Impact des changements climatiques sur le productible annuel.....	5.17

LISTE DES FIGURES

	PAGE
Figure 2-1 Bloc diagramme de la topographie du bassin du fleuve Sénégal	2.3
Figure 2-2 Craton Ouest-africain	2.7
Figure 2-3 Emprise des travaux topographiques IGN sur fond carte mondiale Delorme	2.16
Figure 2-4 Carte des isohyètes interannuels (1951-1980)	2.19
Figure 2-5 Débits moyens journaliers à Goubassi	2.22
Figure 2-6 Variation du cycle hydrologique à Goubassi – Moyenne gaussienne	2.22
Figure 2-7 Station de Goubassi comparée aux stations voisines – Moyenne gaussienne des valeurs annuelles sur 25 ans	2.23
Figure 3-1 Corrélation pluie-ruissellement annuel pour le bassin de Goubassi.....	3.5
Figure 3-2 Carte administrative de la zone d'étude et stations météo	3.6
Figure 3-3 Plan d'ensemble du périmètre de Sangalou	3.16
Figure 3-4 Les types d'exploitation à Gouthioubé	3.16
Figure 3-5 Coupe schématique illustrant l'évolution récente des vallées des fleuves des régions de l'intérieur de l'Ouest Africain.....	3.19
Figure 3-6 Carte de localisation des mines d'or	3.30
Figure 4-1 Polygones de Thiessen.....	4.1
Figure 4-2 Isohyètes interannuels reconstitués (1958-2008)	4.2
Figure 4-3 Distribution de la pluie mensuelle moyenne sur le bassin de Goubassi (1958-2008).....	4.3
Figure 4-4 Tendence à long terme des précipitations – Pluie centrée sur le bassin de Goubassi	4.3
Figure 4-5 Courbe intensité-durée-fréquence au site de Goubassi	4.4
Figure 4-6 Analyse de la fréquence des pointes de crues	4.6
Figure 4-7 Analyse de la fréquence des volumes de crues	4.7
Figure 4-8 Validation du modèle de laminage sur l'ancienne crue de conception (SENCO 1970)	4.8
Figure 4-9 Laminage de la crue de 1000 ans (SLII 2011).....	4.8
Figure 4-10 CMP de Goubassi.....	4.10
Figure 4-11 Comparaison de l'évaporation nette de Manantali et de Goubassi	4.12
Figure 4-12 Courbe de tarage au site de Goubassi	4.13
Figure 4-13 Courbe d'emmagasinement de la retenue selon SENCO (1970).....	4.15
Figure 4-14 Retenue de Goubassi – Volume	4.15
Figure 4-15 Retenue de Goubassi – Surface.....	4.16

Figure 4-16 Coefficient de classification du réservoir de Gourbassi	4.19
Figure 4-17 Profondeur des sédiments dans le réservoir de Gourbassi	4.21
Figure 4-18 Courbe d'emmagasinement après 100 ans de sédimentation	4.21
Figure 5-1 Hydrogramme de crue pour la culture de décrue – Gibson A	5.5
Figure 5-2 Simulation de la gestion de Manantali (2002-2004).....	5.6
Figure 5-3 Simulation de la gestion de Manantali (2005-2007).....	5.6
Figure 5-4 Simulation de la gestion de Manantali (2008-2009).....	5.7
Figure 5-5 Gestion de Gourbassi – Année normale	5.8
Figure 5-6 Gestion de Gourbassi – Année sèche type	5.8
Figure 5-7 Gestion de Gourbassi – Année humide type	5.9
Figure 5-8 Débit non atteint pendant N jours à Bakel (faibles débits).....	5.11
Figure 5-9 Débit dépassé pendant N jours à Bakel (forts débits).....	5.12
Figure 5-10 Effet de la cote de gestion maximale (marnage = 9 m et débit nominal = 90 m ³ /s)	5.14
Figure 5-11 Effet du marnage (niveau minimal d'exploitation = 85 m s.m. et débit nominal = 90 m ³ /s)	5.15
Figure 5-12 Effet de la puissance installée (C.R.N. = 94 m s.m. et marnage = 9 m)....	5.16

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES UTILISÉS DANS LE TEXTE

APD	Avant-projet détaillé
APS	Avant-projet sommaire
CG _{Max}	Cote de gestion maximale (niveau maximal auquel la retenue peut monter en exploitation normale ; ou « cote de retenue normale » ¹ ou « niveau maximal d'exploitation » ²)
CG _{min}	Cote de gestion minimale (niveau d'abaissement le plus bas de la retenue en exploitation normale ; ou « niveau minimal d'exploitation »)
CMP	Crue maximale probable
CRD	Centre Régional de Documentation de l'OMVS
DNA	Direction Nationale de l'Agriculture (Mali)
DNGR	Direction Nationale du Génie Rural (Mali)
DRA	Direction Régionale de l'Agriculture (Mali)
DRDR	Direction Régionale du Développement Rural (Sénégal)
DTGC	Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques (Sénégal)
E	Est
FAO	« <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> » (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FIT	Front intertropical
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IGM	Institut Géographique du Mali
IGN	Institut Géographique National (France)
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
Ma	Millions d'années
MES	Matières en suspension

¹ Terme utilisé par SENEGAL-CONSULT

² Terme usité en Amérique du Nord

MIFERSO	Société des Mines de Fer du Sénégal Oriental
N	Nord
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OMVS	Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
PGIRE	Programme de Gestion Intégrée des Ressources en Eau et de Développement des Usages à Buts Multiples dans le Bassin du Fleuve Sénégal
PMP	Pluie maximum probable
S	Sud
SAED	Société nationale d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du fleuve Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé (Sénégal)
SAM	Site aménagé
SENCO	SENEGAL-CONSULT
SIG	Système d'information géographique
SLII	SNC-Lavalin International Inc.
SNA	Site non aménagé
SONADER	Société Nationale de Développement Rural (Mauritanie)
SRTM	« <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> »
TAHA	Type d'aménagements hydro agricoles
UBT	Unité de bétail tropical
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
UTM	« <i>Universal Transverse Mercator</i> »
W	Ouest
WGS84	« <i>World Geodetic System 1984</i> »

LISTE DES UNITÉS UTILISÉES DANS LE TEXTE

°	degré
'	minute (1' = 1/60°)
°C	degré Celsius
g	gramme
GWh	gigawatt-heure
h	heure
ha	hectare (1 ha = 10 000 m ²)
hm ³	hectomètre cube (1hm ³ = 1 000 000 m ³)
km	kilomètre
km ²	kilomètre carré
km/h	kilomètre heure
kV	kilovolt
m	mètre
mm	millimètre
min	minute (1 min = 60 s)
m ²	mètre carré
m ³	mètre cube
m s.m.	mètre au-dessus du niveau de la mer
m ³ /s	mètre cube par seconde
min	minute
MVA	mégavolt-ampère
MW	mégawatt
s	seconde
V	volt

CHAPITRE 1

Introduction

1. INTRODUCTION

1.1 PREAMBULE

Le site du projet de Goubassi se trouve sur la rivière Falémé au kilomètre 250 en amont de la confluence Falémé – fleuve Sénégal, dans une section où le cours d'eau sert de frontière entre le Mali et le Sénégal.

Dans le cadre de sa stratégie d'accroissement de la maîtrise des ressources en eau et de valorisation du potentiel énergétique du bassin du fleuve Sénégal, l'OMVS fixe au projet d'aménagement hydroélectrique à buts multiples de Goubassi l'objectif de contribuer à la régularisation des débits du fleuve Sénégal pour permettre l'agriculture irriguée et la navigation sur le fleuve et à une augmentation de la production d'énergie hydroélectrique.

Le présent rapport des études hydrotechniques constitue un recueil des données hydrologiques mises à jour et des résultats des études hydrologiques et de régularisation menées par SLII pour servir de support à la planification et à la détermination des caractéristiques principales de l'aménagement hydroélectrique de Goubassi.

Ce rapport est le deuxième rapport remis à l'OMVS dans le cadre de l'étude de faisabilité et d'avant-projet sommaire de l'aménagement hydroélectrique de Goubassi conformément aux termes du Contrat entre le Haut Commissariat de l'OMVS et SLII.

1.2 RESUME DES ETUDES ET RECONNAISSANCES PRECEDENTES

Bien qu'un grand nombre d'études et de documents existent sur le fleuve Sénégal et dans une moindre mesure sur le bassin du Sénégal Supérieur, peu de documents concernant directement la Falémé ou l'aménagement hydroélectrique de Goubassi ont été identifiés.

En 1968-1970, SENEGAL-CONSULT avait étudié l'hydrologie de la Falémé dans le cadre du projet d'un système de contrôle des débits dans le bassin du Sénégal Supérieur et avait établi le dimensionnement de l'aménagement de Goubassi en tant qu'ouvrage complémentaire de régularisation du fleuve Sénégal. Associée à l'importante réserve de Galougo, qui garantirait un débit de 440 m³/s au seuil de Bakel, la retenue de Goubassi permettait d'atteindre 500 m³/s [Réf. 23 à Réf. 26].

Selon SENEGAL-CONSULT, à la cote de retenue normale de 94 m s.m., la capacité totale de Goubassi serait de 2,1 milliards de m³ et la superficie du plan d'eau de 250 km², la retenue s'étendant en partie au Mali et en partie au Sénégal.

Or le projet de Galougo, situé 20 km en aval de la confluence Bafing – Bakoye, a été abandonné en raison de ses coûts directs et indirects importants et c'est Manantali qui assure désormais la régularisation des deux tiers des apports du fleuve.

Les caractéristiques de l'aménagement de Goubassi s'inscrivaient donc dans un contexte bien précis qui n'est plus pertinent aujourd'hui. Depuis lors, aucune révision du cadre hydrologique de référence n'a été menée alors qu'il a été observé une baisse marquée du régime des eaux de la Falémé.

1.3 OBJECTIFS ET PORTEE DES ETUDES HYDROTECHNIQUES ACTUELLES

1.3.1 Objectifs des études

Les présentes études hydrotechniques visent les objectifs suivants :

- Établir le cadre hydrologique de référence afin d'obtenir une série temporelle représentative des débits au site du barrage proposé et les estimations de fréquence des crues couvrant la gamme complète des crues de chantier et de conception ;
- Évaluer l'effet des apports solides sur la vie utile de la retenue projetée et éventuellement le dimensionnement des ouvrages de dévasement ;
- Évaluer le potentiel de production d'énergie en fonction des objectifs et des contraintes de régularisation afin de fournir les données nécessaires pour la comparaison de plusieurs variantes de dimensionnement et l'optimisation de la cote de gestion maximale et de la puissance installée qui seront entreprises à une phase ultérieure de l'étude.

1.3.2 Portée des études

Les études hydrologiques et hydrotechniques actuelles comprennent les activités principales suivantes :

- **Revue des données hydrologiques**

Les données hydrologiques et météorologiques pertinentes au projet sont regroupées dans la base de données HYDRACCESS mise à la disposition de SLII par l'OMVS³. La revue des données permet d'établir la série hydrologique de base à Gourbassi la plus représentative pour déterminer le productible et le potentiel de régularisation du projet.
- **Évaluation de l'impact des changements climatiques**

On établit une série hydrologique « sèche » et trois séries futures selon les projections du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [Réf. 12]. L'impact sur le débit moyen turbiné et évacué est alors évalué ainsi que la valeur du productible annuel.
- **Étude des crues**

On établit un hydrogramme et un laminage de crue. La pluie maximale probable (PMP) ainsi que la crue maximale probable (CMP) résultante sont calculées selon la méthode de l'OMM [Réf. 14].

³ Base de données HYDRACCESS (BDH_OMVS1.MDB, Version 2010), maintenue par l'OMVS et fournie à SLII pour les besoins de l'étude.

-  **Étude des pluies**

Une analyse intensité-durée-fréquence des pluies dans la zone du réservoir est réalisée en vue de l'aménagement du territoire (drainage et recasement).
-  **Choix du débit réservé minimal**

Les besoins en eaux pour l'agriculture et pour les mines servent à déterminer le débit réservé minimal à restituer en période très sèche qui est pris en compte dans les simulations de régularisation.
-  **Évaluation de l'évaporation nette au site**

L'évaporation nette au site est établie en réalisant une étude d'évaporation des nappes d'eaux libres selon la méthode Penman⁴ avec les données météorologiques existantes ainsi qu'en compilant une série de données d'évaporation mesurée provenant de plusieurs autres études.
-  **Évaluation des apports solides**

Une méthode empirique de l'USBR [Réf. 29] est utilisée pour établir le risque d'envasement du réservoir ainsi que la vie utile projetée.
-  **Mise à jour des besoins en eau**

Une visite de terrain et des enquêtes auprès des services compétents des États membres de l'OMVS et des compagnies minières présentes dans la zone du projet ont permis d'établir l'étendue des principaux besoins en eau.
-  **Évaluation de la régularisation et des caractéristiques de la retenue.**

Il s'agit ici de réaliser une simulation journalière de la gestion de la retenue ainsi que de quantifier l'impact des lâchers d'eau à Bakel.
-  **Simulation de la production d'énergie et de la régularisation**

Cette activité consiste à évaluer le productible mensuel et à évaluer l'impact des différentes série hydrologiques sur le niveau du réservoir et sur la fiabilité de rencontre des objectifs de l'aménagement.

⁴ La méthode de Penman est basée sur une formule empirique utilisant la température, le vent, l'humidité relative pour établir l'évaporation journalière.

CHAPITRE 2

Données de base

2. DONNÉES DE BASE

2.1 SITUATION GÉNÉRALE

2.1.1 Localisation et accès principaux

Le projet de Gourbassi se situe sur la rivière Falémé 250 km en amont de sa confluence avec le fleuve Sénégal, à la frontière avec le Mali en rive droite (Région de Kayes, Cercle de Kéniéba, Commune Rurale de Dialafara) et le Sénégal en rive gauche (Région de Kédougou, Département de Saraya, Arrondissement de Sabodala, Commune Rurale de Missira Sirimana).

Le site du barrage envisagé est localisé entre les villages maliens de Berola (ex-Gourbassi) et Farikounda sur le tronçon de la Falémé s'écoulant en direction nord, aux coordonnées UTM 29N WGS84 suivantes : 208 000 m E et 1 483 614 m N (jonction de l'axe proposé et de la piste d'accès rive droite).

Deux accès routiers sont possibles pour rejoindre le site de Gourbassi :

1) Accès Est (rive droite)

De Kayes (Mali) au nord, la route Kayes-Kéniéba non revêtue dessert les mines de Yatéla et Sadiola puis conduit vers le sud jusqu'au village de Bourdala. De Kéniéba (Mali) au sud, la même route dessert d'abord les mines de Tabakoto et Loulo vers le nord avant de conduire jusqu'à Bourdala.

De Bourdala, en direction de l'ouest jusqu'à Kéniégoulou puis du sud en direction de Linnguékoto, une piste ravinée conduit jusqu'au village de Bérola (ex-Gourbassi) en rive droite de la Falémé. De Bérola, la petite piste longeant la Falémé en direction de Farikounda permet de rejoindre la rive droite du site des ouvrages.

2) Accès Sud (rive gauche)

De Kédougou (Sénégal), la route nationale bitumée RN7 en direction du nord-est conduit à Saraya. De Saraya, en direction du nord, la route départementale D507 non revêtue traverse les villages de Kondokhou, Missira, Balakonko et conduit jusqu'au village de Sayansoutou en rive gauche de la Falémé, village situé en face de celui de Bérola. Une petite piste vers l'ouest permet de rejoindre la rive gauche du site des ouvrages.

2.1.2 Configuration générale du site de Gourbassi

Dans la zone située entre les villages de Berola et Farikounda, la vallée de la Falémé est caractérisée par une absence relative de relief. Il s'agit essentiellement d'une plaine horizontale ou à pente très douce, et sur laquelle il est facile de circuler en véhicule, même à l'extérieur des pistes ; seules quelques petites collines rocheuses s'élèvent ici et là au-dessus de la plaine tandis que de petits marigots l'entaillent.

Au site envisagé pour les ouvrages, le cours de la Falémé est séparé par une île rocheuse d'une largeur de 200 m et d'une longueur de 650 m environ. À cet endroit, la rive droite présente une plaine assez uniforme, séparée par des pédiplaines, avec un

plateau assez étendu à la cote 80 m s.m. Le terrain y est très peu accidenté. En rive gauche, il y a une colline assez marquée qui atteint la cote 123 m s.m. Sur le cours de la rivière, le chenal principal est, en général, de l'ordre de 5 à 10 m plus bas que le niveau général des berges. En rive droite, le talus est constitué d'une colline latéritique alors qu'en rive gauche, il est principalement rocheux.

2.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES⁵

2.2.1 Caractéristiques générales du bassin du fleuve Sénégal

2.2.1.1 Le fleuve Sénégal

Long de 1800 km, le fleuve Sénégal est le second plus important cours d'eau de l'Afrique de l'Ouest, après le fleuve Niger. Il prend naissance dans le nord de la Guinée, traverse la partie occidentale du Mali, puis constitue, sur tout le reste de son parcours, la ligne de frontière entre les territoires de la République du Sénégal et de la République Islamique de Mauritanie. Il draine un bassin de près 300 000 km², partagé par la Guinée (11%), le Mali (53%), la Mauritanie (26%) et le Sénégal (10%).

Le lecteur trouvera en Annexe A un plan de situation (Planche Go1) qui offre une représentation schématique du réseau hydrographique du fleuve Sénégal et des infrastructures principales dans le bassin.

Le bassin du fleuve Sénégal comprend trois régions principales qui se différencient fortement par leurs conditions géologiques, hydrographiques et climatologiques :

- 1) Le « Haut Bassin » ou bassin du Sénégal Supérieur, situé en amont de Bakel, région tourmentée et montagneuse, constituée des bassins de la Falémé, du Sénégal-Bafing, du Bakoye et du Baoulé, qui fournit la quasi-totalité des apports et qui se partage entre les 3 Républiques de Guinée, du Mali et du Sénégal ;
- 2) Le « Vallée » ou Sénégal Inférieur, en aval de Bakel, plaine alluviale très plate, où la cote maximale ne dépasse pas 400 m s.m. (Massif de l'Assaba), et où le Sénégal inscrit ses méandres au milieu d'une vallée très large encadrée par des régions semi-désertiques ;
- 3) Le « Delta », partie terminale du fleuve Sénégal en aval de Dagana, apparemment un delta avec de multiples bras mais où il n'y a qu'une seule embouchure.

Les limites du bassin versant du fleuve Sénégal sont assez mal définies au nord du 15^e parallèle car l'aridité du climat et l'uniformité du relief font disparaître progressivement le système hydrographique.

⁵ Les informations sur les caractéristiques physiques des bassins du fleuve Sénégal et de la Falémé sont tirées des références [Réf. 7, Réf. 9, Réf. 13, Réf. 12 et Réf. 23].

2.2.1.2 Le relief

L'extrémité méridionale du bassin est la plus montagneuse. Elle est constituée en territoire guinéen par le massif du Fouta Djalon, et en territoire malien par le plateau Mandingue (Figure 2-1). Le point culminant du bassin versant du fleuve Sénégal est à une altitude de 1465 m s.m. ; il se situe au sud de Dalaba dans les monts Kavendou qui surplombent les sources du Sénégal-Bafing et de la Téné.

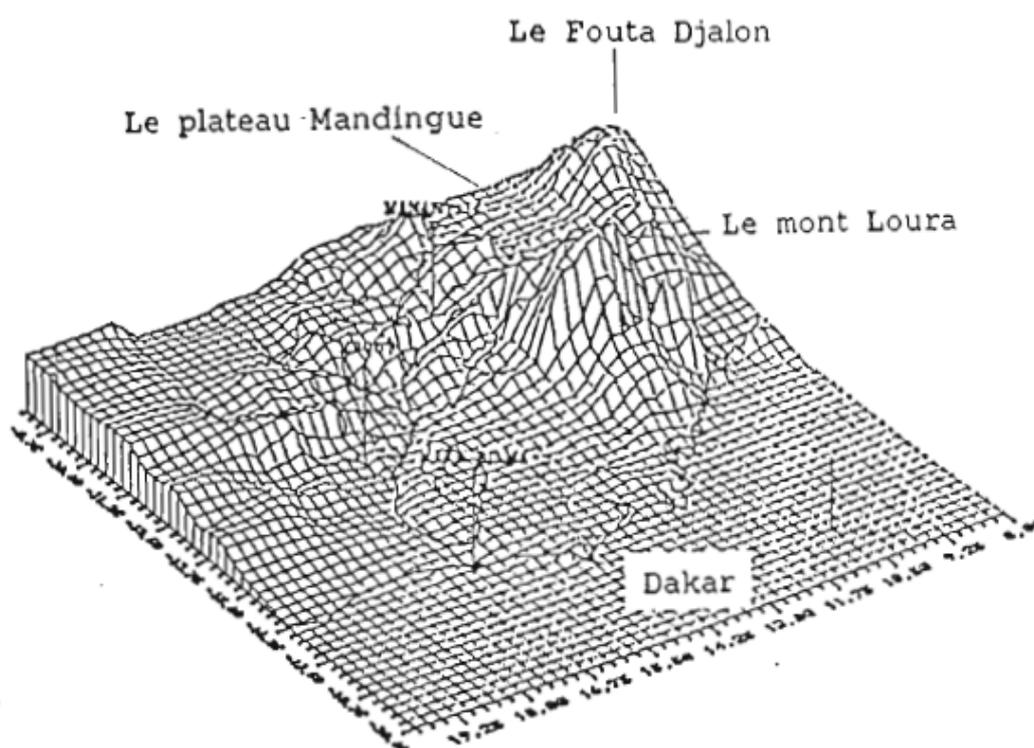


Figure 2-1 Bloc diagramme de la topographie du bassin du fleuve Sénégal⁶

La dorsale guinéenne, imposant "bourrelet" de hautes terres situées à plus de 1000 m s.m. d'altitude constitue une originalité du relief de l'Afrique occidentale. Elle est divisée en deux vastes ensembles bien distincts séparés par un très large ensellement qui correspond au cours supérieur du Niger. La partie nord est formée des hauts plateaux gréseux et doléritiques du Fouta Djalon dont les niveaux étagés se terminent le plus souvent par d'imposants escarpements. Le plateau le plus septentrional, celui de Mali en Guinée, surplombe les plaines avoisinantes d'un millier de mètres et culmine au mont Loura à 1538 m s.m. d'altitude (point culminant du bassin versant du fleuve Gambie).

Le plateau Mandingue fait suite au Fouta Djalon vers le NE. Il est moins élevé et n'atteint que 800 m s.m. dans sa partie la plus haute, près du rebord méridional ; c'est une succession de plateaux séparés par des couloirs ou des plaines et dont les altitudes sont variables. Le plateau Mandingue ne présente une allure massive que sur ses bordures occidentales (falaise de Tambaoura) et méridionales (monts Mandingues). Les

⁶ Source : [Réf. 7]

rivières Bafing, Bakoye et Baoulé coulent dans de larges plaines ou s'encaissent dans les plateaux gréseux passant d'une diaclase à l'autre par de brusques coudes.

Au nord de ce plateau, dans la partie NE du bassin versant du fleuve Sénégal, en domaine sahélien, les plaines alternent avec les plateaux. Les vallées de la Kolombiné et du Karakoro, au N et au NE de Kayes, s'allongent entre le massif doléritique de Bafoulabé et les reliefs gréseux de l'Affolé et de l'Assaba. Le modelé général s'aplatit et les altitudes sont inférieures à 100 m s.m.

2.2.1.3 Le réseau hydrographique

La densité du réseau hydrographique de surface du bassin du fleuve Sénégal témoigne de la nature imperméable des terrains. À Bakel, le fleuve Sénégal a déjà reçu la quasi-totalité de ses affluents (Planche Go5 présentée en Annexe A).

Le **fleuve Sénégal** en amont de Bakel est formé par la jonction du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé. Le Bafing peut être considéré comme la branche mère du fleuve Sénégal bien que son bassin versant total ne soit que de 38 400 km².

Le **Bafing** prend sa source dans le Fouta Djallon à 960 m s.m. d'altitude, à 17 km au NW de Mamou. Son cours supérieur est sinueux et entrecoupé de rapides. Il circule entre des massifs granitiques et doléritiques qui lui imposent de fréquents changements d'orientation. Il reçoit successivement la Téné (dont les sources sont situées en contrebas du mont Kavendou, point culminant du bassin) et la Kioma sur sa rive gauche. Après sa sortie du Fouta Djallon à Daka-Saïdou il reçoit en rive droite le Balé, à 250 m s.m. d'altitude, avant de prendre la direction SE-NW jusqu'à sa confluence avec le Balinn. Le barrage de Manantali, destiné à régulariser les crues du Bafing, a été implanté entre les confluences avec le Balé et le Balinn. Le Bafing s'oriente ensuite N-S jusqu'à Bafoulabé où il reçoit les apports du Bakoye : à Bafoulabé, le Bafing a parcouru 750 km. Plus en aval et associé au Bakoye, il porte désormais le nom de Sénégal. De Bafoulabé à Bakel, le Sénégal prend la direction SE-NW et traverse une région peu accidentée entrecoupée cependant par quelques rapides ou par des chutes (seuil de grès de Talari, chutes de Gouina et de Félou). Au-delà du plateau Mandingue, ses principaux affluents en rive droite sont la Kolimbiné (près de Kayes) et le Karakoro (à 70 km en amont de Bakel). En rive gauche, il reçoit un seul affluent important : la Falémé (à 50 km en amont de Bakel).

Le **Bakoye** occupe un bassin versant de 85 600 km² et prend sa source aux monts Ménien (au NW de Siguiri en Guinée), sur les contreforts du plateau Mandingue à 760 m s.m. d'altitude. Il atteint rapidement la cote 400 m s.m. après avoir traversé successivement une région granitique par une série de chutes et de rapides, puis une région sans relief accusé constituée de schistes birrimiens et de grès. D'orientation générale SE-NW, son principal affluent est le Baoulé qu'il reçoit à Siramakana avant sa confluence avec le Bafing.

Le **Baoulé**, dont le bassin versant se déploie sur une superficie de l'ordre de 60 000 km² prend sa source à 750 m s.m. d'altitude dans une région située au SW de Bamako. Il traverse, dans la partie supérieure de son cours, des reliefs doléritiques, puis il débouche sur le plateau Mandingue où sa faible pente et le manque de relief lui font décrire de nombreux méandres. Il a une direction sensiblement N-S puis, après avoir dessiné deux importantes boucles, il rejoint le Bakoye en suivant une direction NE-SW.

La **Falémé** qui s'étend sur une superficie d'environ 30 000 km² prend sa source en Guinée dans une région de plateaux doléritiques qui s'élèvent à 850 m s.m au NE de Tougué. Le point culminant du bassin versant (928 m s.m.) se situe sur la ligne de crêtes qui le sépare du bassin de la Gambie.

La **Kolimbiné** et le **Karakoro** drainent toute la zone désertique de la région nord du bassin amont du Sénégal. Ils rejoignent la rive droite du fleuve après avoir traversé des zones basses et marécageuses. Leurs écoulements sont peu importants par suite de l'aridité croissante du climat. Leurs bassins sont entièrement situés en zone sahélienne entre les isohyètes 200 et 500 mm.

2.2.1.4 La géomorphologie

Les plateaux et le glacis constituent les traits géomorphologiques dominants du Haut Bassin du fleuve Sénégal. Les zones morphologiques suivantes ont été identifiées :

- **De grandes surfaces d'aplanissement cuirassées du secondaire et de l'éocène et disposées en gradins successifs** – Leur topographie plane contraste fortement avec leurs rebords escarpés. Cette morphologie est due à la présence en surface d'une cuirasse latéritique d'une dizaine de mètres d'épaisseur qui a moulé chaque aplanissement, préservant ainsi au cours des âges ces témoignages du modelé général.
- **Un relief intermédiaire de moyenne altitude cuirassé sur les versants** – Cette nouvelle surface mixte (surface de remblaiement lorsqu'elle se confond avec le sommet des dépôts du Continental Terminal, surface d'érosion quand elle tranche les formations antérieures) s'est développée au cours du Pliocène. Sa position au raccord des anciennes surfaces du Secondaire, de l'Eocène et des glacis façonnés au cours du Quaternaire lui a valu ce qualificatif de relief intermédiaire.
- **Trois glacis (haut, moyen, bas) d'extension très variables** - Durant le Quaternaire ancien, la surface d'érosion du Pliocène supérieur a été rajeunie et détruite sur de vastes étendues par le réseau hydrographique qui a entaillé les cuirasses latéritiques et permis la mise en place d'importantes nappes détritiques, constituées de matériaux fins, de galets et de graviers de cuirasses ; le haut glacis s'est alors formé par accumulation et migration des sesquioxydes. Au cours d'une seconde phase de creusement, le haut glacis a lui-même été entaillé, et les éléments de cette érosion ont contribué, en contrebas, à la formation du moyen glacis, avec également addition de sesquioxydes par migration latérale. Une deuxième entaille a entraîné la formation du bas glacis selon le même processus.

Les glacis s'ordonnent toujours dans les paysages en fonction du réseau hydrographique puisque leur façonnement est lié aux entailles des cours d'eau. Ils constituent donc des surfaces d'érosion locales. C'est pourquoi les glacis d'une même génération se situent souvent à des altitudes très différentes d'une région à l'autre, selon la position initiale du niveau de base sur lequel ils se sont développés. Leur extension dans le bassin dépend de trois facteurs: la résistance à

l'altération du substrat rocheux, le domaine bioclimatique où ils se situent et leur position dans le bassin versant.

Le **haut glacis** s'étale largement dans les contreforts du Fouta Djalon et s'insinue jusqu'au cœur du massif le long des grands axes hydrographiques. On le trouve en bordure du Bafing et il connaît de même une grande extension dans le plateau Mandingue méridional. Par contre il a été fortement disséqué par l'érosion dans le bassin de la Falémé où prédominent des roches sensibles à l'altération biochimique.

Le **moyen glacis**, développé par érosion différentielle dans les formations tendres, occupe encore de vastes étendues dans les pays de la Falémé et du plateau Mandingue.

Le **bas glacis** se distingue des glacis plus anciens par l'absence de cuirasse ferrugineuse continue et par la faible épaisseur des formations meubles masquant le substratum rocheux. Ce dernier niveau n'est jamais perché, mais occupe les parties déprimées du paysage.

2.2.1.5 Les grands ensembles géologiques et lithologiques

Le bassin du fleuve Sénégal et de ses affluents est compris dans des unités géologiques anciennes.

Le bassin du Sénégal Supérieur se situe sur la bordure sud-ouest du craton Ouest-africain (Figure 2-2). Ce vaste complexe géologique précambrien, stabilisé à la fin de l'orogénèse éburnéenne vers 1800-1600 Ma, est ceinturé par des zones mobiles formées ou rajeunies au cours de cycles orogéniques ultérieurs, panafricains (660 et 550 Ma), hercynien (250 Ma) ou encore alpin (60 Ma).

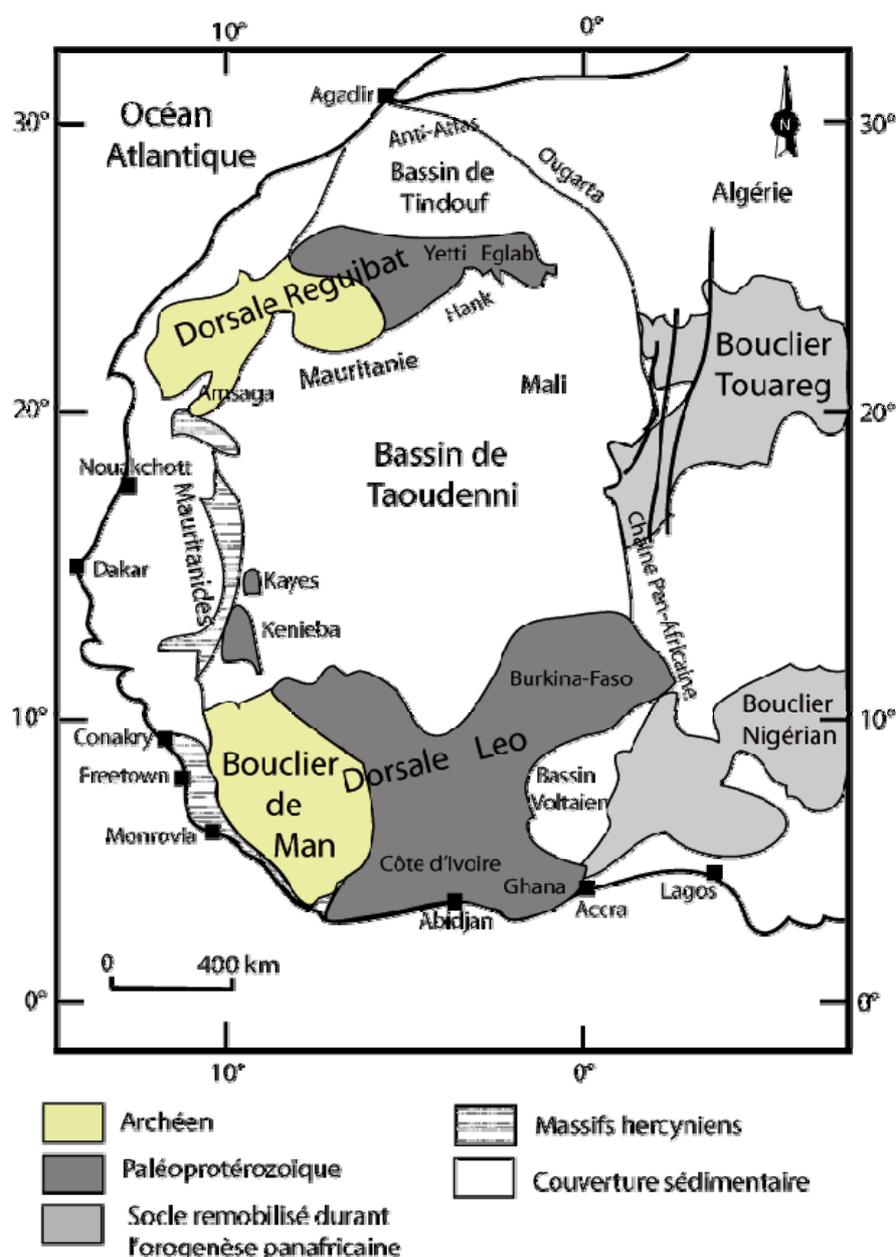


Figure 2-2 Craton Ouest-africain

Huit grandes unités structurales ont été différenciées :

1) Les formations birrimiennes du socle (fenêtres de Kayes, de Kéniéba et dorsale de Léo)

Les affleurements du socle sont représentés, au nord par la fenêtre de Kayes, à l'ouest par celle de Kéniéba et au sud sur les hauts reliefs du bassin par l'extrémité septentrionale de la dorsale de Léo. Le socle est constitué de formations birrimiennes faiblement métamorphisées d'origine sédimentaire ou éruptive et ayant subi diverses granitisations. Il est classiquement divisé en deux séries métamorphiques comprenant d'une part, un ensemble de schistes verts et de grauwackes, et d'autre part des formations volcaniques faiblement métamorphisées.

Le faciès schisteux, attribué au Birrimien inférieur, s'étend de part et d'autre du cours supérieur de la Falémé. Il comprend des schistes sériciteux, des talcschistes et des micaschistes, le plus souvent à muscovite; les grauwackes et quartzites représentent d'anciens grès feldspathiques mal classés. On trouve également des cipolins bien individualisés en deux groupes d'affleurements d'une puissance de 2300 m : l'un est situé au SW de Kédougou, l'autre sur la Falémé dans la fenêtre de Kéniéba. Ce sont des calcaires dolomitiques pouvant évoluer vers des faciès siliceux ou marneux.

Les roches volcaniques du Birrimien supérieur sont désignées sous le terme de roches vertes. Ce complexe volcano-sédimentaire, faiblement métamorphisé, se compose de tufs, de brèches volcaniques, de metabasaltes et métagabbros, de métaandésites et d'amphibolites associés à des grauwackes et conglomérats, et à des formations sédimentaires métamorphiques : cipolins, quartzites, arkoses, grès et schistes. Elles affleurent au nord du granite de Kayes, en rive gauche du cours inférieur du Karakoro, et de part et d'autre du cours moyen de la Falémé (au NE de Kédougou et en contrebas des grès infracambrien de la falaise de Tambaoura au Mali).

Les deux séries métamorphiques ont subi diverses granitisations liées à l'orogénèse éburnéenne. Les granites syntectoniques, les plus fréquents et les plus répandus, constituent le vaste ensemble granito-gneissique de la dorsale de Léo qui délimite la bordure méridionale du bassin versant du Sénégal, et les deux fenêtres de Kayes et de Kéniéba (comprenant le massif granitique de Kakadian). Les granites post-tectoniques sont très localisés. Ils se présentent en petits massifs circulaires ou ovales : ces roches plutoniques tardives sont formées de granites non orientés et de porphyres quartzifères.

2) Les bassins du Protérozoïque supérieur (bassin de Madina Kouta, plateau de l'Affolé pro parte, plateau Mandingue pro parte)

En bordure du socle, d'importantes couches sédimentaires reposent en discordance majeure sur les séries métamorphiques et les granites intrusifs.

Ces dépôts, essentiellement gréseux, occupent la majeure partie des hauts bassins versants des fleuves Sénégal et Gambie. Dans le paysage, cette couverture constitue :

- Une grande partie du plateau de l'Affolé au Nord de Kayes ;
- Le plateau Mandingue dont le contact avec le socle est matérialisé par la falaise de Tambaoura ; et
- Le NE du Fouta Djallon où elle correspond à la couverture sédimentaire du bassin de Madina Kouta.

3) La chaîne panafricaine des Bassarides (séries de la Falémé et de Bakel-Mbout)

Elle englobe toutes les formations plissées de la bordure occidentale du craton ouest-africain et n'affleure que partiellement sur le flan MW du Haut Bassin du fleuve Sénégal et le long du cours inférieur de la Falémé. Ces formations sont recouvertes en discordance par les dépôts détritiques de la couverture du Protérozoïque supérieur et du Paléozoïque inférieur. Il a

été proposé pour la mise en place le modèle d'une chaîne issue de la collision de deux masses continentales, consécutive à la fermeture d'un rift intracontinental entre 1000 et 650 Ma

4) Les bassins molassiques du Protérozoïque terminal et Cambrien inférieur (groupe du Wassangara, groupe de Koniakari et groupe de Nioro)

La couverture molassique représente la phase d'érosion de la chaîne du Panafricain I des Bassarides. Elle englobe l'ensemble des formations, reposant en discordance sur la chaîne des Bassaris et son avant-pays qui comprend le soubassement granitisé et la couverture argilo-gréseuse du bassin de Madina Kouta, et correspond au comblement des dépressions disposées en sillons parallèles à la chaîne.

La particularité de ces formations sédimentaires détritiques, déposées dans une zone orogénique en fin de tectonisation, est de débiter par un marqueur lithostratigraphique, d'une continuité extraordinaire sur des milliers de kilomètres, connu sous l'appellation de « la triade ». Elle comprend un conglomérat de base (complexe glaciaire de la « tillite inférieure »), coiffé par des dolomies calcaires à barytine, surmontées par des silexites à faciès jaspes.

5) Les formations sédimentaires cambro-dévonniennes (groupe de Pita)

Les terrains sédimentaires paléozoïques débutent en général par des épandages gréseux cambro-ordoviciens de plate-forme continentale mis en place par un réseau fluvial « en tresses », succédant aux dépôts de comblement des sillons molassiques de la chaîne panafricaine et antérieurs à une phase de sédimentation marine de plate-forme épicontinentale à scolithes (grès à scolithes du toit du groupe de l'Assaba Tagant et du toit du groupe des plateaux d'Oujeft dans l'Adrar de Mauritanie).

Ces épandages se terminent par un épisode glaciaire qui correspondrait à la glaciation fini-ordovicienne.

Ces sédiments paléozoïques sont surtout connus dans le bassin Bové. Dans le bassin de Taoudéni, ces formations paléozoïques sont situées en Mauritanie dans les plateaux de l'Assaba et du Tagant, la falaise du Hodh et surtout dans l'Adrar.

6) Les venues doléritiques permo-triasiques

Les dolérites du Permien et du Trias, forment avec les grès les principaux reliefs des bassins versants supérieurs des fleuves Sénégal et Gambie. La répartition des venues doléritiques et leur mode de gisement dépendent des roches traversées : elles sont sous forme de dykes au sein des roches granitiques et métamorphiques, et de dykes et de sills à l'intérieur des couches sédimentaires. Le métamorphisme de contact développé par les injections de dolérites est assez important et surtout ces dolérites semblent avoir développé un phénomène d'hydrothermalisme qui concerne tout le bassin de Taoudéni et en particulier sa partie nord. Il a donné naissance à une diagénèse de haute température et pratiquement tous les minéraux argileux y seraient diagénétiques. Il se traduit par la transformation des pélites et des grès calcaires ou argileux en schistes et des autres grès en quartzites. Les

cornéennes sont très répandues dans le massif de Mali au sud du bassin et dans la région de Bafoulabé-Nioro du Sahel où elles prennent en écharpe la partie méridionale du bassin versant de la Kolimbiné.

Ce sont des roches foncées, grisâtres à verdâtres, à grains de dimensions variables, très dures.

7) Le bassin méso-cénozoïque sénégal-mauritanien

Ce vaste bassin sédimentaire qui s'étend du nord de la Mauritanie au sud du Sénégal s'est mis en place à partir du Trias et durant le Tertiaire. Seules les formations de l'Eocène et du Continental terminal affleurent. Le Continental terminal est un complexe sédimentaire qui se dépose de l'Eocène au Quaternaire et qui résulte de l'altération d'une série marine.

Des sables et des grès tendres ou argileux dominant et alternent avec des bancs d'argiles. Cette série constitue la partie supérieure du bassin sénégal-mauritanien. Elle n'apparaît qu'à l'extrémité NE du bassin, en contact discordant avec les terrains paléozoïques du Sénégal oriental. Par endroit, l'érosion a mis à jour la couche sédimentaire concordante sous-jacente de l'Eocène. Cette série d'origine marine, grés-argileuse affleure surtout le long de la vallée du Sénégal en aval de Bakel,

8) Les formations latéritiques et superficielles

Les latérites présentent en Afrique occidentale une extension considérable. Elles y constituent d'épais profils, qui peuvent atteindre plus de 50 mètres, développés par altération des roches mères sous-jacentes.

Sur les roches granitiques, les latérites sont de teintes orangées, très argileuses et riches en grains de quartz résiduels. Sur les schistes, elles sont rouges violacées, à grains fins et elles se délitent en plaquettes.

Les autres formations superficielles sont constituées d'alluvions, de dunes et de quelques dépôts loessiques. Les alluvions garnissent les vallées alluviales du fleuve Sénégal et de ses affluents : il s'agit de limons très fins, peu argileux, de sables et de graviers. Des bancs de sables ou dunes recouvrent l'extrémité ENE du bassin à l'est de Nioro du Sahel. Des recouvrements de limons éoliens saupoudrent les reliefs, principalement les plateaux latéritiques et les glacis élevés dans le Fouta Djallon et dans le plateau Mandingue méridional.

2.2.1.6 L'hydrogéologie

Les régions où le soubassement géologique est constitué de roches éruptives et de roches métamorphiques ont longtemps été considérées comme peu propices à l'existence en quantité facilement exploitable d'eau souterraine.

La capacité de rétention du Haut Bassin est très faible et toutes les formations géologiques pouvaient y être considérées comme imperméables, les systèmes aquifères se réduisant à des cuvettes topographiques peu étendues, dans les roches métamorphiques comme dans les grès.

Depuis quelques années les progrès réalisés, tant dans le domaine de l'hydrogéologie que dans des disciplines connexes (hydrologie de surface, géomorphologie, pédologie et géochimie), ont montré que sous certaines conditions, ces formations pouvaient receler des ressources exploitables.

Hydrogéologie des roches éruptives et métamorphiques

A l'état sain et massif, ces roches présentent une porosité nulle ou négligeable. Des exceptions existent bien sûr et sont loin d'être négligeables. En règle générale cependant, l'emmagasinement d'eau n'y est possible que si les roches ont été soumises à des transformations postérieures à leur genèse, d'ordre météorique ou tectonique y ayant développé une zone d'altération de plus ou moins grande porosité ou un réseau de fissures ou de fractures non colmatée. En effet, sous l'action du climat tropical, caractérisé par des températures élevées et l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, les roches éruptives et les roches métamorphiques subissent une altération météorique qui les transforme en un complexe plus ou moins hétérogène de sables et d'argiles, d'épaisseur variable au-dessus du socle sain.

Ce sont ces altérites qui constituent des réservoirs potentiels d'eau et qui forment de bons aquifères si leur épaisseur atteint au moins une dizaine de mètres. D'autre part, pour que ces nappes puissent se constituer et persister, il est nécessaire que la pluviométrie annuelle soit suffisante pour les recharger. Cette alimentation suppose que la hauteur des pluies excède la hauteur évapotranspirée en surface (interception par la végétation et évaporation au sol) et le déficit d'humidité du sous-sol dû à l'évaporation différée (prélèvements par les racines des végétaux, évaporation souterraine). En effet, toute lame de pluie qui s'infiltré est vite absorbée par les capillaires fins tant que ceux-ci ne sont pas rechargés : l'alimentation des nappes n'intervient qu'après la réhumectation des terrains qui les recouvrent et cette réhumectation consomme beaucoup d'eau dans les régions tropicales, à longues saisons sèches.

La perméabilité des terrains

L'existence de vides dans un matériau ne suffit pas à assurer sa qualité en tant qu'aquifère ; il faut aussi que les vides communiquent entre eux. Cette notion définit la perméabilité d'un terrain. Si la porosité des arènes et des argiles d'altération est élevée (30 à 45%), leur perméabilité du fait de la finesse des conduits est souvent très faible, parfois même négligeable.

Dans le bassin du Sénégal, les granites et les grès sont des roches à circulation de fissures ou à alternance de couches perméables et imperméables. Les roches vertes et les schistes sont des roches encore susceptibles de renfermer des niveaux aquifères. Enfin, les dolérites et quartzites sont des roches totalement imperméables.

Les aquifères

Le caractère fondamental du Haut bassin est donc l'absence de nappes généralisées. En effet, 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 des formations récentes (alluvions, éluvions et 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. Cette zone est

donc imperméable dans l'ensemble mais entretient des nappes peu importantes et très localisées bien connues des populations locales.

2.2.2 La rivière Falémé

La rivière Falémé constitue le dernier affluent important du fleuve Sénégal en amont de Bakel (la confluence est située à 50 km en amont de Bakel). La Falémé a, dans l'ensemble, une orientation de son cours sensiblement parallèle à celui du Bafing. Elle prend sa source à 800 m s.m. d'altitude dans une région de plateaux doléritiques dans le Fouta Djallon guinéen à environ 30 km au NE de Tougué.

Elle a un cours supérieur assez irrégulier prenant tour à tour une direction N-S puis E-W, ensuite SW-NE afin de contourner les sills doléritiques importants. Ensuite, elle traverse une région plus plate, constituée de schistes birrimiens en prenant des orientations variées. Ces changements d'orientation de son cours sont dus à la présence de reliefs constitués par des affleurements de dolérites, qui traversent les schistes birrimiens. La Falémé n'est rejointe par des affluents d'une certaine importance que dans sa partie supérieure où l'on rencontre entre autres le Kouloun-Ko en rive droite et le Balim-Ko ainsi que le Koila-Kabé en rive gauche. En aval de sa confluence avec le Kouloun-Ko elle prend une direction W-E jusqu'à Fadougou (cote 110 m s.m., km 440 depuis la confluence Falémé – fleuve Sénégal). De Fadougou à Goubassi, elle coule suivant une orientation SE-NW, puis s'infléchit encore plus vers l'ouest pour reprendre une direction S-N jusqu'à Kidira et sa confluence avec le fleuve Sénégal.

La Falémé, plus que les autres rivières du bassin, dessine dès sa sortie des reliefs doléritiques une série impressionnante de grands méandres dans une plaine d'érosion parsemée de petits inselbergs ou de buttes latéritiques. Dans le second tiers de son cours, entre Fadougou et Goubassi, elle traverse une suite de petits rapides dus à des seuils rocheux constitués tantôt de bancs de grès durs, tantôt de roches vertes ou de microgranites. L'altération a intensément attaqué les roches qui n'apparaissent à l'état frais que dans le lit des rivières.

La Falémé a une pente moyenne de 1,24‰ correspondant à une longueur de 625 km pour une dénivelée de 777 m. La partie supérieure de son cours a une pente extrêmement forte puisqu'elle passe de l'altitude 800 m s.m. à l'altitude 200 m s.m. en 70 km environ, soit une pente de 8,57‰. La pente s'adoucit ensuite pour n'être plus que de 0,24‰ entre Fadougou et sa confluence avec le fleuve Sénégal.

Aussi bien du point de vue morphologique que géologique, le bassin de la Falémé présente peu d'avantages à tout projet de barrage. Le site de Goubassi a été identifié dans les études antérieures de mise en valeur du bassin comme le seul emplacement du cours inférieur de la Falémé où la morphologie s'y prête tant soit peu. Dans le cours supérieur, en amont de Fadougou, les conditions géologiques semblent meilleures.

2.3 DONNEES DE BASE TOPOGRAPHIQUES

2.3.1 Rappel des données topographiques disponibles en début d'étude

Les documents topographiques à disposition de SLII au début de l'étude sont essentiellement constitués par des cartes IGN à diverses échelles. Ces cartes sont listées dans le Tableau 2-1 ci-dessous.

Tableau 2-1 Liste des cartes topographiques générales disponibles

Titre	Source	Échelle	Date	Emprise ⁽¹⁾
CARTE TOURISTIQUE MALI	IGN	1:2 000 000	Publication 1993 Images Landsat Terrain 1985 Mise à jour partielle 1992	Ensemble du pays
CARTE TOURISTIQUE SENEGAL	IGN	1:1 000 000	Publication 1993 Mise à jour partielle 1991	Ensemble du pays
CARTE DE L'AFRIQUE DE L'OUEST – KOSSANTO – FEUILLE ND-29-VII Carte IGN - Paris	IGM	1:200 000	1 ^{ère} Edition : 1957 Réimpression : 1970	12°W, 14°N 11°W, 13°N Site de Goubassi et zone d'intérêt de l'étude (bassin de retenue)
BAKEL ND-28-XVIII	DTGC	1:200 000	Édition 2005 Images SPOT 5 et Landsat Terrain 2004	13°W, 15°N 12°W, 14°N
DALAFI ND-28-XII	DTGC	1:200 000	Édition 2005 Images SPOT 5 et Landsat Terrain 2004	13°W, 14°N 12°W, 13°N
KOSSANTO ND-29-VII	DTGC	1:200 000	Édition 2005 Images SPOT 5 et Landsat Terrain 2004	12°W, 14°N 11°W, 13°N Site de Goubassi et rive gauche de la zone d'intérêt de l'étude (bassin de retenue)
SARAYA ND-29-I	DTGC	1:200 000	Édition 2005 Images SPOT 5 et Landsat Terrain 2004	12°W, 13°N 11°W, 12°N
CARTE DE L'AFRIQUE DE L'OUEST – KHOSSANTO 1b – FEUILLE ND-29-VII-1b Carte IGN - Paris	DTGC	1:50 000	1 ^{ère} Edition : Juillet 1967	11°45'W, 13°15'N 11°30'W, 13°00'N Zone d'intérêt de l'étude (bassin de retenue)
CARTE DE L'AFRIQUE DE L'OUEST – KHOSSANTO 1d – FEUILLE ND-29-VII-1d Carte IGN - Paris	DTGC	1:50 000	1 ^{ère} Edition : Juillet 1967	11°45'W, 13°30'N 11°30'W, 13°15'N Zone de Goubassi

Titre	Source	Échelle	Date	Emprise ⁽¹⁾
CARTE DE L'AFRIQUE DE L'OUEST – KHOSSANTO 2ac – FEUILLE ND-29-VII-2a-c Carte IGN - Paris	DTGC	1:50 000	1 ^{ère} Edition : Juillet 1967	11°30'W, 13°20'N 11°15'W, 13°00'N Zone d'intérêt de l'étude (bassin de retenue)

Note : ⁽¹⁾ L'emprise des cartes correspond aux coordonnées des deux points extrêmes

Il n'existe pas de cartes topographiques récentes au 1:50 000^e (ou à une échelle plus grande) de la zone d'intérêt pour l'étude. Compte tenu de l'ancienneté des cartes existantes au 1:50 000^e, les informations qui y figurent ne sont pas une représentation fidèle de la réalité du terrain pour tout ce qui concerne camps, villages, pistes, réservoirs et pour les infrastructures minières (et les villages qui ont grandi autour).

Selon les dossiers de 1970 que SLII a pu consulter au Centre Régional de Documentation de l'OMVS (CRD) et reprographier en totalité, SENEGAL-CONSULT avait établi la topographie au 1:20 000^e des bassins de retenue et au 1:2000^e des sites de barrages pour tous les sites envisagés dans le bassin du Sénégal Supérieur, dont celui de Goubassi [Réf. 23 et Réf. 24].

Selon ces mêmes documents, SENEGAL-CONSULT avait sous-traité à l'IGN la cartographie au 1:20 000^e des principaux bassins. À cet effet, l'IGN avait réalisé sur la Falémé une couverture aérophotogrammétrique au 1:40 000^e et des profils de terrain par le procédé APR rattachés aux chaînes de nivellement de précision IGN. Des restitutions au 1:20 000^e avec équidistances de 5 m jusqu'à la cote 106 IGN avaient été effectuées pour le bassin d'accumulation de Goubassi (667 km²).

Normalement, SENEGAL-CONSULT aurait dû fournir avec les rapports la topographie au 1:20 000^e et au 1:2000^e sous forme de planches indépendantes pouvant être reproduites et présentant les courbes de niveau espacées de 5 m et de 2 m respectivement, ainsi que la liste des points cotés.

Or, le volume sur la topographie de SENEGAL-CONSULT [Réf. 24] présente seulement la méthodologie suivie et les techniques employées pour établir la cartographie au 1:20 000^e des bassins de retenue (et au 1:2000^e pour les sites de barrages) pour tous les sites envisagés dans le bassin du Sénégal Supérieur, dont celui de Goubassi. Il ne contient pas de planches au 1:20 000^e présentant les courbes de niveau espacées de 5 m du bassin de retenue de Goubassi.

Les plans inclus dans ce dossier sont tous des plans de schématisation des travaux de SENEGAL-CONSULT et non des cartes topographiques (cf. Rapport de lancement page 3.7 pour la liste des plans y figurant [Réf. 28]).

Ainsi, les seules données topographiques de SENEGAL-CONSULT relatives à Goubassi disponibles en début d'étude étaient celles figurant sur les dessins contenus dans le volume traitant de l'aménagement [Réf. 26], à savoir :

-  GOURBASSI – SITUATION DE LA RETENUE, Fig. 7-2-02, Échelle 1:200 000
-  GOURBASSI – BARRAGE, SITUATION, Fig. 7-2-05, Échelle 1:5000

Ces dessins ne permettaient pas de reconstituer le fond topographique au 1:20 000^e nécessaire à l'étude de l'aménagement en particulier pour ce qui concerne la vérification de la relation niveau-volume-surface établie par SENEGAL-CONSULT et l'optimisation de la réserve utile et de la puissance installée de l'aménagement.

De multiples recherches tant au CRD de l'OMVS à St-Louis qu'aux services cartographiques nationaux du Mali et du Sénégal, n'ont pas permis de retrouver la carte topographique au 1:20 000^e établie par SENEGAL-CONSULT.

Selon l'IGN (France) qui avait réalisé en 1967-1968 la restitution cartographique au 1:20 000^e du bassin de Gourbassi et que SLII a consulté à la suite de la mission de lancement, les données topographiques originales auraient été remises à l'époque aux Nations Unies.

En novembre 2010, IGN France International informait SLII qu'une copie des travaux spéciaux de topographie de 1968 sur la région de Gourbassi avait été conservée dans ses archives et qu'il disposait de 3 exemplaires de 15 cartes papier monochromes de format 63x90 cm (copies des cartes en couleur livrées aux Nations Unies en 1968) et des 45 négatifs correspondants aux couches altimétrie, planimétrie et hydrographie.

À la demande de SLII, l'IGN, ne pouvant se séparer des 3 derniers exemplaires de ces cartes, a soumis une proposition pour la numérisation et le géoréférencement de chaque feuille monochrome et la vectorisation de chacun des trois éléments altimétrie (courbes de niveau au 5 m, points cotés), planimétrie et hydrographie.

Compte tenu des retards qui s'accumulaient en raison du manque des données topographiques à grande échelle, fin novembre 2010 SLII passait commande à IGN France International d'une copie numérisée et vectorisée des cartes au 1:20 000^e.

2.3.2 Éléments topographiques au 1:20 000^e du bassin de retenue

SLII prenait réception le 19 janvier 2011 des données vectorisées sur le fond image résultant après la numérisation, l'assemblage et le géoréférencement des 15 cartes papier monochromes de sorte qu'il était alors possible de monter le modèle numérique de terrain du bassin de retenue de Gourbassi et de procéder à l'étude hydrologique présentée dans ce rapport.

Les éléments topographiques au 1:20 000^e de la zone de Gourbassi (telle que délimitée sur la Figure 2-3) livrés par IGN France International et disponibles pour l'étude se composent :

- D'une copie numérique à une résolution de 600 dpi des 15 cartes topographiques monochromes au 1:20 000^e IGN 1968 ;
- De la copie numérique des 38 dalles de 10 km sur 10 km composant la mosaïque du bassin de retenue, géoréférencées dans le système WGS84 Projection UTM29 ; et

 Des éléments altimétriques et hydrographiques vectorisés⁷.

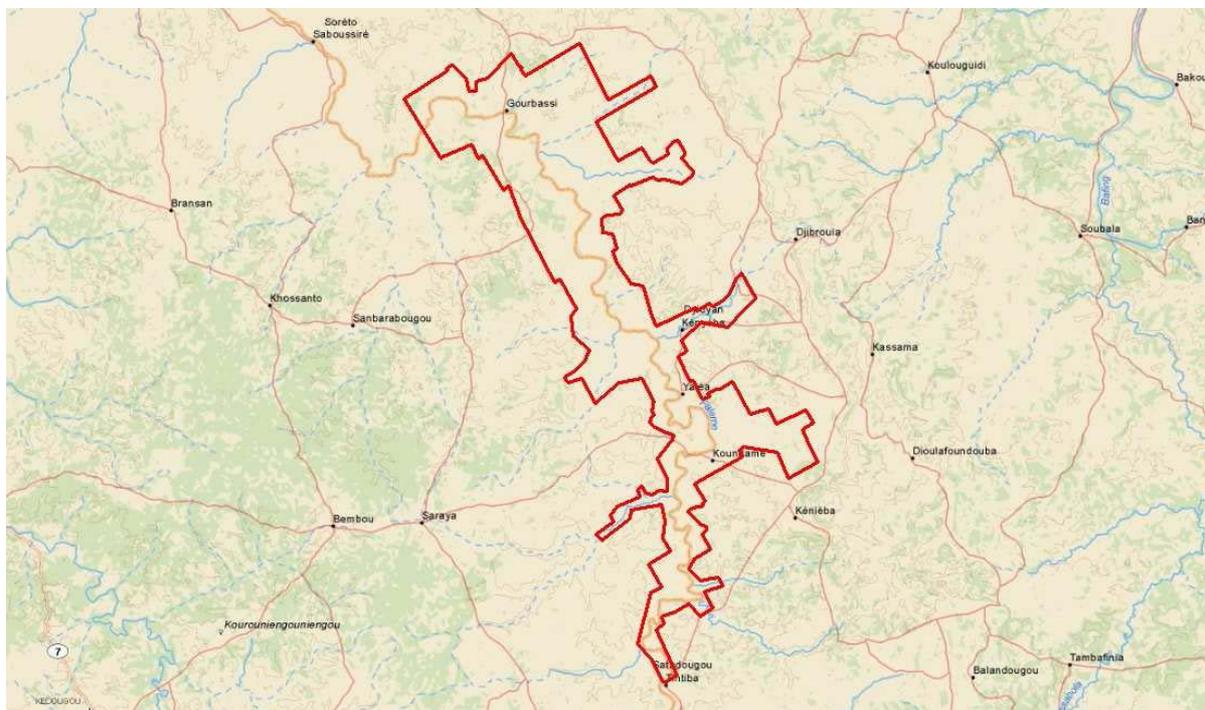


Figure 2-3 Emprise des travaux topographiques IGN sur fond carte mondiale Delorme

Ces données sont suffisantes pour les besoins immédiats des études hydrotechniques relatives à l'aménagement de Gourbassi et du diagnostic socio-environnemental au stade de l'avant-projet sommaire (APS) mais elles ne pourront pas répondre aux besoins ultérieurs de l'avant-projet détaillé (APD) et des études d'impact environnemental et socio-économiques réglementaires. Une campagne de reconnaissances topographiques détaillées de la zone de retenue projetée s'avère alors indispensable.

2.4 DONNEES CLIMATIQUES

2.4.1.1 Le climat

Le bassin du Sénégal Supérieur, situé entre les régions tropicales humides et les confins du Sahara, présente une grande diversité climatique. Son climat est caractérisé par l'alternance de deux grandes saisons annuelles : la saison des pluies en été (de juin à octobre) et la saison sèche en hiver (novembre à mai). Ce régime pluviométrique permet de caractériser l'année climatique. Il est assujéti aux interactions de deux types de circulation aérienne : l'harmattan, chaud et sec, véhiculé par des vents de secteur NE en provenance de l'anticyclone saharien, et la mousson, chaude et humide, acheminée par des vents de secteur SW issue de l'Atlantique sud. L'interface de ces deux masses d'air est le Front Intertropical (FIT) ; c'est sa trace au sol qui constitue l'équateur météorologique. Les déplacements du FIT sont déterminés, au cours de l'année, par les

⁷ La vectorisation des éléments planimétriques n'a pas été réalisée car les pistes et contours des agglomérations de 1968 ne correspondent plus aux réalités du terrain.

positions respectives des centres de hautes pressions. Ils évoluent en un mouvement de bascule entre deux extrêmes.

En hiver, l'anticyclone continental boréal centré sur le Sahara et l'anticyclone des Açores sont puissants : l'équateur météorologique se situe vers 4° de latitude nord ; cette position méridionale extrême est généralement atteinte en décembre-janvier. L'anticyclone saharien dirige vers les basses latitudes tropicales un flux fort et régulier : l'harmattan souffle en permanence du NE. Il est localement perturbé par des discontinuités d'alizés maritimes engendrées par l'anticyclone des Açores. Les seules précipitations éventuelles durant cette période, le « heug » communément appelé par les profanes « pluie des mangues », ont une origine extratropicale. En février, le FIT amorce sa migration vers le nord ; il atteint le sud du bassin de la Gambie en mars et franchit le 13° parallèle (limite septentrionale du Fouta Djallon) en mai-juin. Les premières pluies à caractère orageux sont alors provoquées par l'arrivée des lignes de grains.

En été, l'anticyclone subtropical de Sainte-Hélène se renforce : les masses d'air équatoriales, tièdes et humides, couvrent la quasi-totalité du bassin provoquant les averses de la saison des pluies, appelée « hivernage ». En août, le FIT atteint sa position la plus septentrionale vers 20° de latitude nord. L'ensemble de la région reçoit des pluies non orageuses à caractère continu : la mousson prédomine. A l'arrière du front, de puissants mouvements de convection font naître des cumulonimbus à grand développement vertical et des cumulus bourgeonnants qui donnent d'abondantes chutes de pluie. La mousson frappe alors de plein fouet les reliefs du Fouta Djallon. Dès le mois de septembre, le mouvement de translation du FIT s'inverse, et ce balancement du nord vers le sud détermine la durée effective de la saison des pluies qui s'achève en octobre-novembre. En novembre, l'alizé apporte de la fraîcheur puis l'harmattan redevient prédominant en décembre.

La température moyenne annuelle dans le bassin du Sénégal Supérieur est de 28°C, selon les données de la station de Kita [Réf. 27]. La moyenne des températures maximales journalières annuelles est de 34°C et la moyenne des minimums est de 24°C.

L'humidité relative moyenne varie entre 55% et 60%. Les valeurs maximales dépassent 90% et les valeurs minimales entre 10% et 20% selon les saisons [Réf. 26].

2.4.1.2 L'information disponible

L'inventaire des données météorologiques disponibles est présenté au Tableau 2-2 et au Tableau 2-3 ci-dessous.

Tableau 2-2 Inventaire des données disponibles pour chaque station

Evapotranspiration journalière
Insolation journalière
Températures journalières maximales
Températures journalières minimales
Températures moyenne journalières
Humidité moyenne mensuelle
Humidité relative maximale

Humidité relative mensuelle minimale
Insolation moyenne mensuelle
Températures moyennes mensuelles maximales
Températures moyennes mensuelles minimales
Températures moyenne mensuelles
Vitesse moyenne mensuelle du vent

Tableau 2-3 Inventaire des données météorologiques disponibles

Nom	Latitude	Longitude	Date Début	Date Fin
LABE	11,317° N	12,300° W	1-jan-1953	31-déc-1995
SIGUIRI	11,433° N	9,167° W	1-jan-1957	31-déc-1996
KAYES	14,433° N	11,433° W	1-jan-2002	12-jan-2005
BAKEL	14,900° N	12,467° W	16-jan-1983	16-déc-2008

Les données hydrologiques présentées plus bas à l'article 2.5.2 montrent que le régime hydrologique du bassin versant du fleuve Sénégal a subi une baisse d'hydraulicité importante depuis la fin des années 1970. Nonobstant des erreurs de mesures hydrologiques systématiques possibles, la saison sèche est plus marquée et plus longue maintenant qu'elle ne l'était avant 1979. Cette constatation est confirmée par les données pluviométriques.

L'évaporation constitue une variable importante ayant un impact notable sur le débit pouvant être restitué par l'aménagement de Gourbassi. Les pertes par évaporation sont de loin les plus importantes en Afrique : dans les régions sahéennes toute retenue dont la hauteur ne dépasse pas 2 ou 3 m sera forcément naturellement vide avant la saison des pluies.

En vue d'obtenir l'évaporation nette, l'évaporation du réservoir devra être comparée à l'évapotranspiration existant au site avant l'aménagement (pour la saison sèche) tout en considérant également le captage de près de 100% des pluies sur la surface du réservoir (durant la saison des pluies).

Les données de type bac évaporatoire ne sont pas disponibles pour le moment. L'évaporation mensuelle du réservoir proposé sera donc être établie grâce aux données de la base HYDRACCESS. La base de donnée comprend une série de données météorologiques mensuelles : température, humidité relative et insolation. Les données de vent ne sont pas disponibles. Les résultats théoriques seront comparés aux valeurs utilisées pour l'aménagement de Manantali afin d'en assurer leur validité.

2.5 DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES

2.5.1 Données sur les précipitations

Les climatologues distinguent quatre zones climatiques dans le bassin du fleuve Sénégal : le climat sahéen entre les isohyètes 200 et 500 mm, le climat nord soudanien

entre les isohyètes 500 et 800 mm, le climat sud soudanien entre les isohyètes 800 et 1300 mm et le climat guinéen au sud de l'isohyète 1300 mm (Figure 2-4).

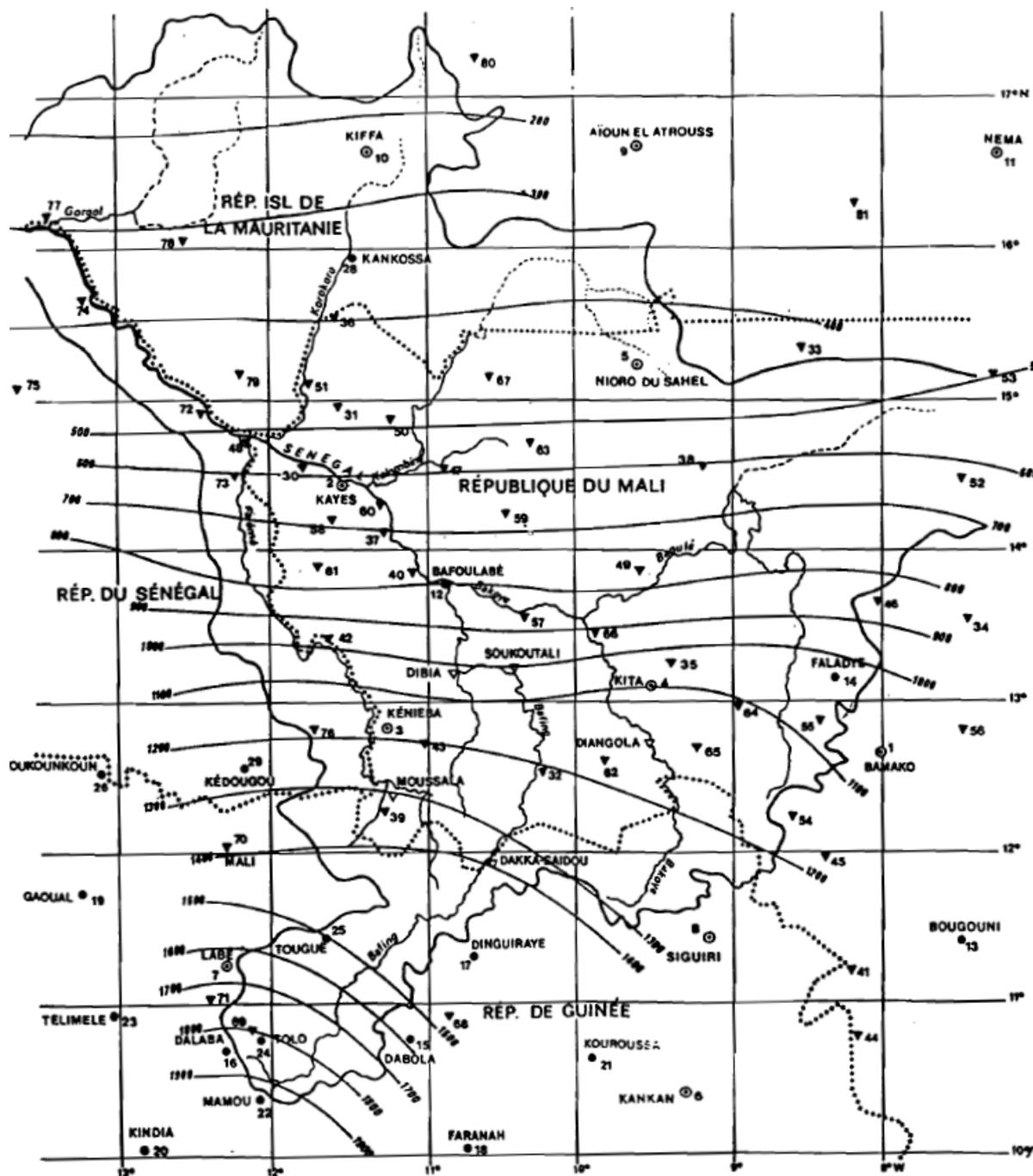


Figure 2-4 Carte des isohyètes interannuels (1951-1980)⁸

Les hydrologues regroupent la zone sahéenne et la zone nord soudanienne sous la même appellation de domaine sahéien [Réf. 9].

⁸ Source : [Réf. 9]

Pour cette étude, on distinguera le domaine sahélien au nord de l'isohyète 800 mm, le domaine soudanien entre les isohyètes 800 et 1300 mm et le domaine guinéen au sud de l'isohyète 1300 mm.

À titre informatif, à Kayes, la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 600 mm ce qui est caractéristique de la zone sahélienne. Le bassin versant à l'étude s'étend donc de la zone sahélienne à la zone guinéenne avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1000 mm.

L'inventaire des données pluviométriques disponibles est fourni dans le Tableau 2-4. L'analyse des données pluviométriques permet d'ores et déjà d'affirmer que les pluies enregistrées indiquent la même diminution du régime (de l'ordre de 55%) que celle montrée par les données de débit.

Tableau 2-4 Inventaire des données pluviométriques disponibles

Nom	Id Station	Date Début	Date Fin	Latitude	Longitude
LABE	1170587000	16-jan-1903	16-déc-2008	11,317° N	12,300° W
SIGUIRI	1170768000	16-fév-1922	16-mai-2007	11,433° N	9,167° W
BAFOULABE	1270001900	16-jan-1931	16-déc-1995	13,800° N	10,833° W
DIAMOU	1270008800	16-juin-1951	16-déc-2005	14,100° N	11,267° W
FALADYE	1270012400	16-jan-1931	16-déc-2002	13,133° N	8,350° W
GALOUGO	1270014200	16-juin-1951	16-mar-2004	13,833° N	11,067° W
GOURBASSI	1270015700	16-juin-956	16-déc-2005	13,400° N	11,633° W
GUENE - GORE	1270016300	16-mai-1956	16-déc-2002	12,733° N	11,017° W
KAYES	1270020800	1-sep-1895	16-fév-2009	14,433° N	11,433° W
OUALIA	1270036700	16-jan-1959	16-mai-2004	13,600° N	10,383° W
SAGABARI	1270039100	16-juil-1959	16-aou-2004	12,600° N	9,800° W
BAKEL	1380000400	16-mai-1918	16-déc-2008	14,900° N	12,467° W
KIDIRA	1380013000	16-juin-1918	16-oct-2009	14,467° N	12,217° W

2.5.2 Données existantes sur les débits

L'OMVS a mis à la disposition du consultant la base de données HYDRACCESS dont le format a été développé par l'IRD. Celle-ci regroupe les données hydrologiques et météorologiques pertinentes au projet. Elle est tenue à jour par l'OMVS qui y incorpore les données transmises par les Directions Régionales de l'Hydraulique.

L'analyse du régime hydrologique de la Falémé à Gourbassi (bassin versant de 16 253 km²) montre une diminution très marquée du débit depuis 1970. Le module annuel pour la période 1953-1979 était de 138 m³/s alors que pour la série 1980-2010 il est de 71 m³/s. Cela aura un impact important sur le dimensionnement de l'aménagement projeté.

Les stations de Kidira (bassin versant de 28 900 km²), de Fadougou (9 350 km²) et des stations sur le cours du Bafing ont été utilisées afin d'apprécier si le phénomène est aussi marqué qu'à la station de Gourbassi. Le Tableau 2-5 montre les résultats de l'analyse préliminaire qui tendent à confirmer que le régime hydrologique du bassin du fleuve Sénégal a subi une baisse de l'ordre de 50% à partir des années 1970.

Tableau 2-5 Comparaison des mesures à Gourbassi aux stations voisines

Station	Cours d'eau	Bassin versant (km ²)	Débit module				
			Période	Débit (m ³ /s)	Période	Débit (m ³ /s)	Baisse
Gourbassi	Falémé	16 253 ⁹	<u>1954-1979</u>	138	<u>1980-2010</u>	71	49%
Fadougou (Drague)	Falémé	9350	<u>1904-1979</u>	105	<u>1980-1994</u>	50	52%
Kidira	Sénégal	28900	<u>1951-1979</u> <i>(Incomplet)</i>	249	<u>1980-2009</u> <i>(Incomplet)</i>	91	63%
Bafing Makana	Bafing	21000	<u>1960-1979</u>	285	<u>1980-1987</u>	173	39%
	(avant Manantali)						
Daka-Saïdou	Bafing	15700	<u>1954-1979</u>	267	<u>1980-1987</u>	194	27%
	(avant Manantali)						

La Figure 2-5 présente les hydrogrammes annuels pour la période allant de 1954 à 2009, ce qui permet d'évaluer les pointes annuelles de débit, la durée moyenne de la saison des pluies et la variabilité hydrologique. La Figure 2-6 permet d'autre part d'apprécier graphiquement la baisse du régime des eaux constatée à Gourbassi. La moyenne gaussienne sur 25 ans montre qu'à la suite d'une baisse prononcée débutée en 1954, au milieu des années 1980 le cycle a atteint un minimum pour ensuite remonter légèrement vers les années 2000. Du début 2000 à aujourd'hui, il semblerait que le régime soit relativement stable.

La Figure 2-7 permet d'apprécier les variations de régime aux stations voisines. En comparant graphiquement la tendance de la Falémé à Gourbassi à celle d'autres stations sur le Bafing et le Sénégal, on peut conclure que la baisse est généralisée sur l'ensemble du Haut Bassin. Il semblerait également que la portion nord du bassin versant, entre Gourbassi et Fadougou, reçoive moins d'apports qu'auparavant, puisqu'à partir des années 1975 l'écart de débit entre les deux stations diminue significativement. Cela concorde avec plusieurs études antérieures (dont [Réf. 22]) qui font état d'un déplacement graduel vers le sud de la zone de faibles précipitations.

⁹ Valeur calculée par outils SIG en utilisant la topographie SRTM.

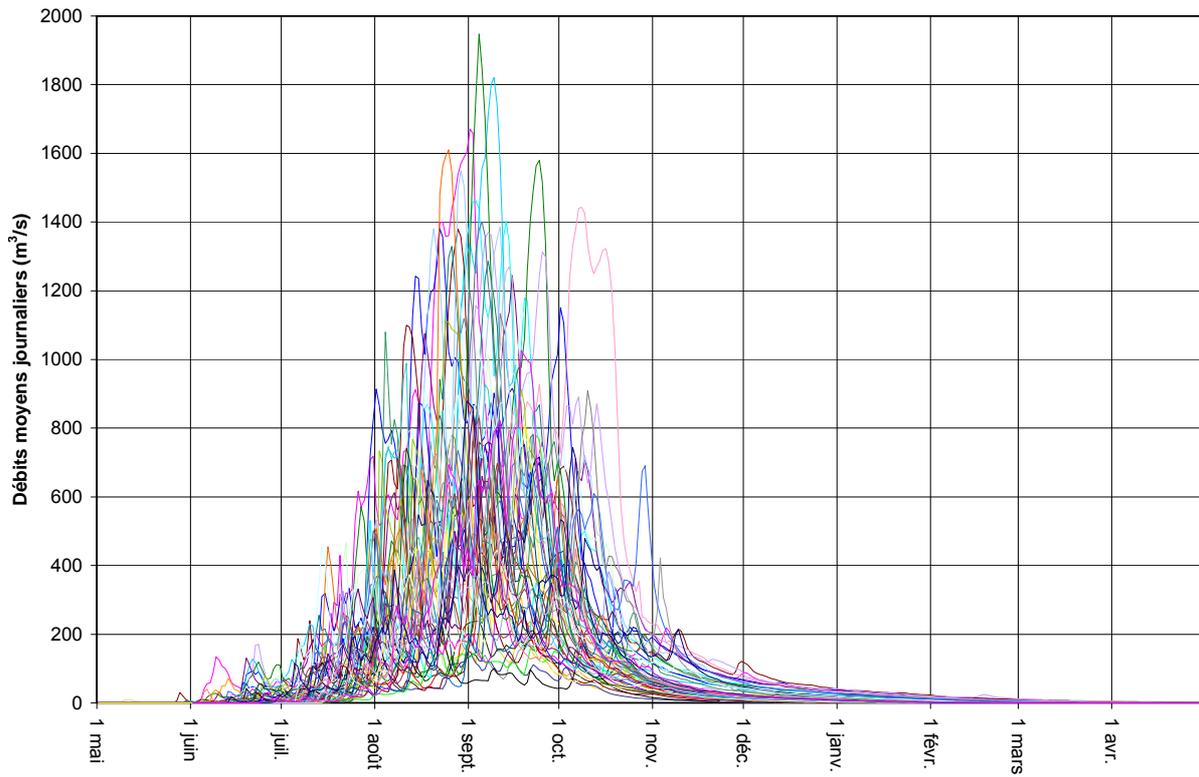


Figure 2-5 Débits moyens journaliers à Goubassi

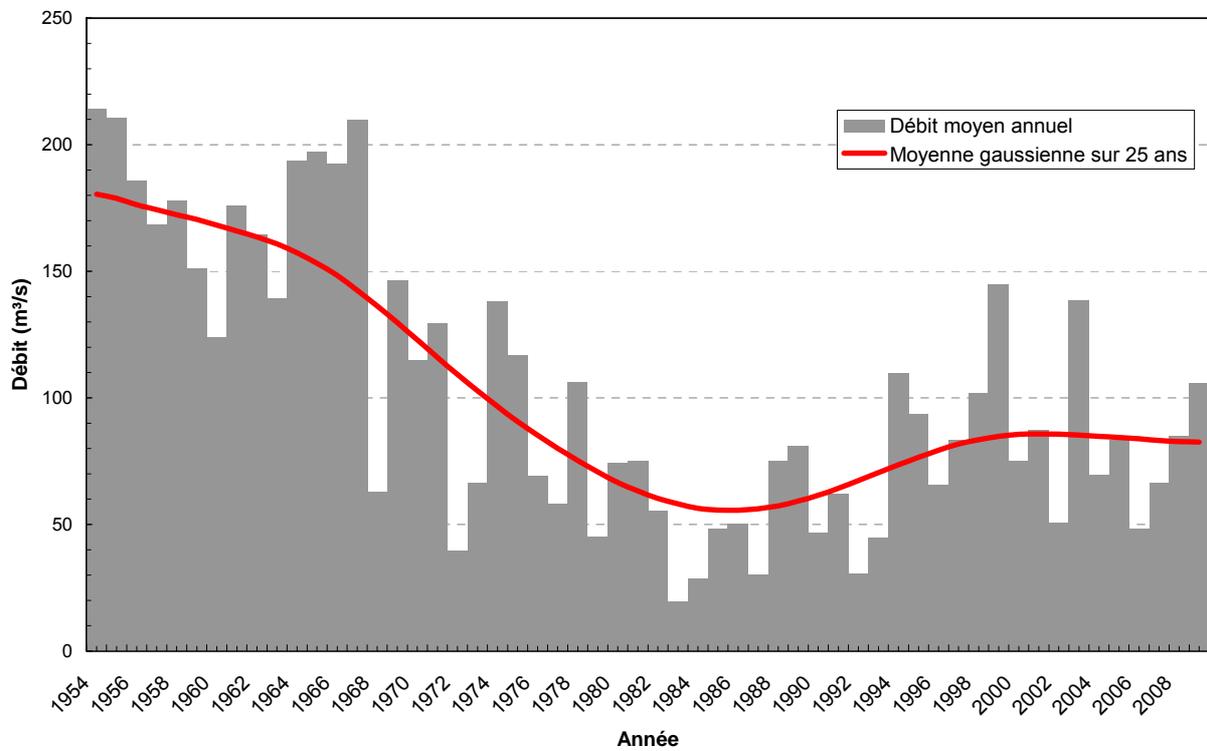


Figure 2-6 Variation du cycle hydrologique à Goubassi – Moyenne gaussienne

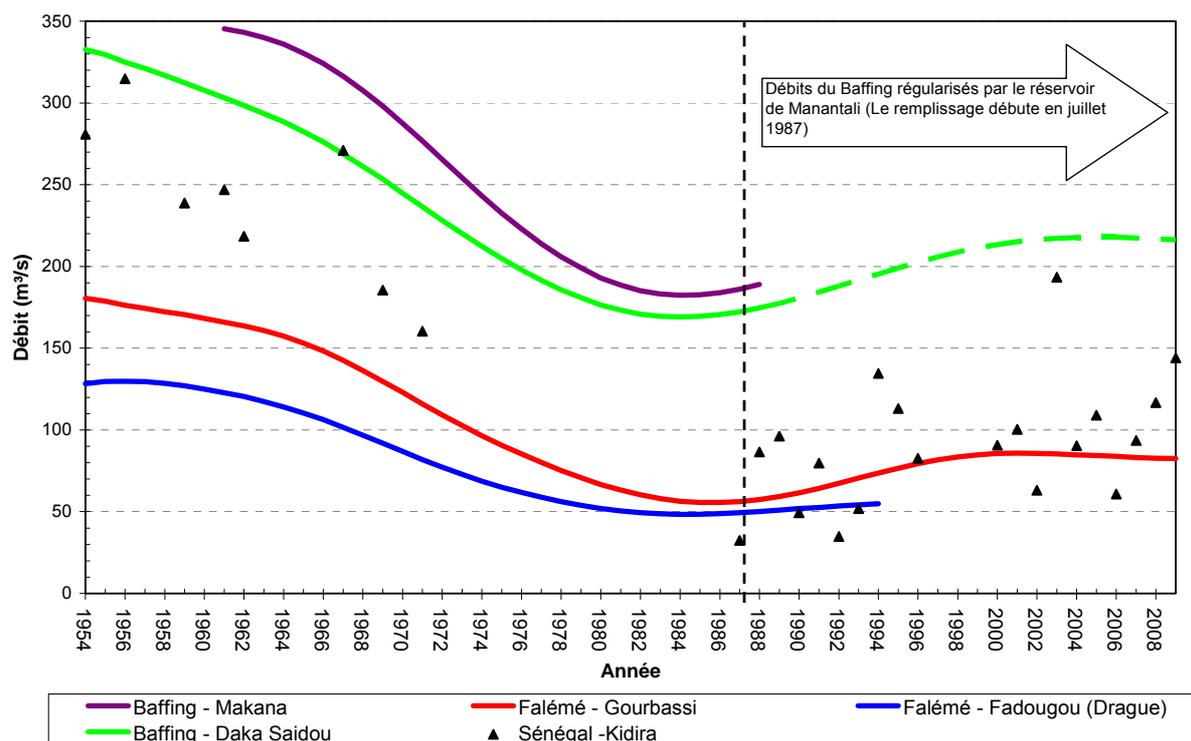


Figure 2-7 Station de Gourbassi comparée aux stations voisines – Moyenne gaussienne des valeurs annuelles sur 25 ans

2.6 DONNEES SUR LES APPORTS SOLIDES

Un élément important dans l'établissement d'un projet de retenue est le volume d'apports solides charriés par le cours d'eau devant être aménagé. Aussi des mesures de transport des solides en suspension et/ou par charriage sur le fond sont elles nécessaires afin de procéder à une évaluation de la masse des transports solides.

Les données relatives au transport de sédiments dans la Falémé sont encore très limitées, voire inexistantes. Dans le cadre de cette étude, SLII a entrepris un programme d'échantillonnage pour prélever des échantillons d'eau de la Falémé au site de Gourbassi pendant la période des hautes eaux et en mesurer la concentration de matières solides en suspension (MES). La campagne de prise d'échantillons a débuté le 18 juillet 2010 et s'est terminée le 14 novembre 2010. Les échantillons ont été analysés au Laboratoire Nationale des Eaux (Ministère de l'Énergie et de l'Eau) du Mali à Bamako.

Les concentrations de matières en suspension mesurées et les débits associés sont résumés au Tableau 2-6 ci-après.

Les résultats de la campagne de mesures de sédiments de 2010 présentés démontrent une diminution de la concentration vers la fin de la saison des pluies. En effet, à partir du mois d'août l'écoulement augmente et la concentration est forte alors que plus tard au mois d'octobre la concentration demeure faible malgré un débit assez important. L'explication proposée pour ce phénomène est que le ratio écoulement de surface / écoulement souterrain a diminué significativement au cours de la période des pluies.

L'écoulement souterrain est plus important à la fin de la saison des pluies et celui-ci transporte une quantité beaucoup plus faible de sédiments qu'un écoulement de même importance en eaux de surface.

Tableau 2-6 Mesures de charges solides réalisées à Gorbassi

N°	Dates	Niveau à l'échelle (cm)	Débit (m ³ /s)	MES (mg/l)
1	18-juil.-2010	96	25,7	138
2	25-juil.-2010	265	212	344
3	1-août-2010	174	90,9	86
4	8-août-2010	301	276	62
5	15-août-2010	242	176	106
6	22-août-2010	406	501	173
7	29-août-2010	404	496	104
8	5-sept.-2010	551	888	106
9	12-sept.-2010	621	1080	40
10	19-sept.-2010	580	971	71
11	26-sept.2010	464	649	24
12	3-oct.-2010	315	303	33
13	10-oct.-2010	380	440	42
14	17-oct.-2010	308	290	21
15	24-oct.-2010	258	200	10
16	31-oct.-2010	200	130	7
17	7-nov.-2010	183	101	9
18	14-nov.-2010	158	74	8

CHAPITRE 3

Mise à jour des données hydrologiques

3. MISE À JOUR DES DONNÉES HYDROLOGIQUES

3.1 SERIE D'APPORTS NATURELS

La base de données HYDRACCESS contient une série de données complète au site de Gourbassi. Le Tableau 3-1 présente la série de base à Gourbassi et le Tableau 3-2 présente la série de base à Bakel. Ces séries de base sont utilisées lors de l'évaluation de l'efficacité de la régularisation de la gestion combinée de l'aménagement de Manantali et de celui de Gourbassi telle que présentée au Chapitre 5.

Tableau 3-1 Série de débits mensuels de base de la Falémé à Gourbassi (en m³/s)

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
1961	14	7	2	1	0	32	182	596	1004	176	58	31	175
1962	18	5	1	0	0	20	107	557	876	282	77	32	165
1963	13	4	2	0	0	0	160	448	579	354	78	28	139
1964	12	4	1	0	1	45	177	484	1194	269	84	39	192
1965	20	9	3	1	0	18	100	806	844	394	111	42	196
1966	24	11	4	1	1	3	66	401	682	904	140	50	191
1967	25	11	6	4	1	36	150	468	1055	560	138	54	209
1968	29	18	7	2	2	4	34	128	350	166	40	19	66
1969	7	2	1	0	0	13	127	402	553	452	133	38	144
1970	19	8	2	1	0	1	60	616	523	104	39	17	116
1971	7	2	1	0	0	12	72	695	578	132	38	15	129
1972	5	2	0	0	0	8	39	158	174	63	20	10	40
1973	2	1	0	0	0	21	29	382	281	60	15	3	66
1974	1	0	0	0	0	1	187	715	474	200	44	14	136
1975	6	2	1	0	0	0	99	282	794	174	38	13	117
1976	4	1	0	0	0	2	106	226	164	174	118	21	68
1977	8	2	1	0	0	1	10	135	375	140	26	8	59
1978	2	1	0	0	0	0	27	476	422	248	60	23	105
1979	9	2	1	0	0	12	53	136	184	113	31	8	46
1980	2	0	0	0	0	5	64	387	343	58	18	7	74
1981	2	1	0	0	0	1	21	327	442	86	16	5	75
1982	1	1	0	0	0	1	23	236	235	124	29	9	55
1983	2	1	0	0	0	5	21	59	104	40	6	1	20
1984	0	0	0	0	0	7	68	120	69	62	9	2	28
1985	0	0	0	0	0	0	37	205	259	62	12	3	48
1986	1	0	0	0	0	0	29	85	325	134	22	6	50
1987	1	1	0	0	0	0	6	79	126	115	27	5	30
1988	1	0	0	0	0	3	100	246	442	77	23	7	75
1989	2	1	0	0	0	0	38	332	447	109	29	9	81
1990	2	1	0	0	0	0	95	176	183	80	17	4	46
1991	1	0	0	0	0	0	71	222	319	97	26	7	62
1992	2	1	0	0	0	4	37	58	206	48	13	3	31
1993	1	0	0	0	0	1	30	96	308	79	19	4	45
1994	1	0	0	0	0	6	57	338	462	294	105	30	108
1995	11	4	1	0	0	2	28	483	396	150	37	14	94
1996	5	1	0	0	0	1	41	219	386	97	29	9	66
1997	3	1	0	0	0	11	44	320	374	185	40	14	83
1998	5	1	0	0	0	0	37	354	627	144	39	14	102
1999	5	2	1	0	0	1	54	469	661	425	82	27	144
2000	11	3	1	0	0	1	90	356	231	156	43	13	75
2001	4	1	0	0	0	1	118	259	465	127	36	21	86

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
2002	11	3	1	0	0	0	44	236	229	67	20	5	51
2003	2	1	0	0	0	0	195	508	661	174	77	28	137
2004	12	4	1	0	0	0	116	199	375	96	31	11	70
2005	3	1	0	0	0	7	60	358	300	212	38	13	83
2006	4	1	0	0	0	1	28	102	243	155	33	10	48
2007	3	1	0	0	0	0	43	222	369	118	30	10	66
2008	2	1	0	0	0	3	77	273	338	260	43	14	84
2009	4	1	0	0	0	4	15	302	697	184	46	15	106
Min	0	0	0	0	0	0	6	58	69	40	6	1	20
Max	29	18	7	4	2	45	195	806	1194	904	140	54	209
Moy.	7	3	1	0	0	6	71	321	443	183	47	16	91

Tableau 3-2 Série de débits mensuels du fleuve Sénégal à Bakel (en m³/s)

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
1961	160	99	54	22	7	134	887	2946	5059	1249	473	255	945
1962	161	99	52	17	5	109	599	2341	3417	1579	594	303	773
1963	183	114	56	23	13	12	602	1690	2658	1928	625	276	682
1964	171	99	47	19	6	211	701	2090	5651	1815	578	329	976
1965	216	139	76	33	14	114	566	3388	5238	1895	643	331	1055
1966	220	137	76	36	16	108	429	1463	2800	3751	828	356	852
1967	222	139	81	35	17	119	638	2490	5032	2588	751	378	1041
1968	261	185	102	46	23	104	491	1046	1808	845	337	217	456
1969	123	72	35	13	5	62	751	1764	2992	2050	879	343	757
1970	203	123	66	32	14	42	368	2262	2410	770	321	188	567
1971	112	69	35	16	7	6	544	2633	2539	778	300	172	601
1972	100	63	30	13	6	73	348	843	1079	510	257	155	290
1973	88	52	26	12	5	145	389	1737	1375	498	226	114	389
1974	69	41	22	9	0	5	767	3285	3323	1392	390	182	790
1975	95	50	17	4	1	0	586	1552	3268	1209	404	188	615
1976	99	52	17	2	0	5	515	1465	1158	1157	895	250	468
1977	134	67	26	6	1	1	261	853	1644	780	239	96	342
1978	46	15	3	0	0	10	393	1725	1800	1304	475	182	496
1979	94	43	9	2	1	54	336	1000	1289	595	304	129	321
1980	59	22	4	0	0	27	341	1549	1962	508	220	111	400
1981	50	17	4	1	0	40	480	1862	1712	679	248	113	434
1982	56	23	4	0	0	0	256	1160	1372	581	244	103	317
1983	49	16	3	0	0	90	398	705	840	459	165	70	233
1984	31	9	2	0	0	47	497	782	596	563	162	65	230
1985	20	6	1	0	0	0	410	1422	1650	584	181	73	362
1986	25	8	3	1	0	0	268	707	1887	869	278	109	346
1987	52	21	6	2	0	0	142	501	945	662	149	79	213
1988	98	72	63	3	70	126	307	773	2265	604	114	46	378
1989	24	25	60	59	67	126	269	1060	1495	670	241	62	346
1990	47	76	78	58	61	88	333	561	585	455	215	71	219
1991	84	89	99	91	86	75	293	955	1162	809	324	182	354
1992	115	159	238	230	221	262	444	377	1427	373	362	163	364
1993	115	206	223	164	174	171	450	530	1387	393	260	26	342
1994	76	116	143	154	149	214	490	1447	2393	1072	1202	1065	710
1995	551	196	155	80	97	193	401	1742	2384	719	313	258	591
1996	240	279	318	224	165	167	423	598	1492	435	249	161	396
1997	98	110	116	81	70	174	408	840	1805	550	113	63	369
1998	88	96	130	131	136	236	435	1113	2513	499	137	116	469

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
1999	104	124	130	115	128	193	433	2157	2761	1883	791	358	765
2000	219	137	124	121	127	333	457	1006	1942	490	344	65	447
2001	60	110	108	109	109	120	412	759	1959	697	405	329	431
2002	224	138	129	121	123	158	354	956	1571	452	226	215	389
2003	191	183	177	174	148	180	843	2311	2808	1236	550	251	754
2004	207	209	264	273	250	237	673	933	1040	399	269	196	412
2005	151	156	194	244	208	320	682	1216	1491	925	359	258	517
2006	193	183	214	258	256	276	428	738	914	587	318	180	379
2007	136	132	163	162	179	181	481	1598	2415	611	243	166	539
2008	147	182	182	218	204	331	808	1129	1715	950	277	130	523
2009	101	135	209	248	288	345	553	1342	2360	926	356	123	582
Min	20	6	1	0	0	0	142	377	585	373	113	26	213
Max	551	279	318	273	288	345	887	3388	5651	3751	1202	1065	1055
Moy.	130	100	89	75	71	123	476	1416	2151	966	384	197	515

Remarque : Les débits mis en évidence reflètent la période post-Manantali.

3.2 IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'impact des changements climatiques sur le projet a été évalué en utilisant les projections climatiques les plus récentes pour l'Afrique de l'Ouest, notamment celles du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [Réf. 12].

Depuis les années 1980, la communauté scientifique mondiale est devenue consciente d'un réchauffement observé sur l'ensemble de la planète et de ses conséquences sur les cycles naturels, en particulier le cycle de l'eau. Des recherches poussées sont menées et des prédictions de plus en plus cernées sont maintenant disponibles pour les différentes régions du globe, y compris l'Afrique de l'Ouest.

Dans cette étude, les prédictions du GIEC sont utilisées pour établir certaines hypothèses relatives au débit à envisager au cours des prochaines décennies. Les séries hydrologiques suivantes ont été établies pour les simulations de régularisation :

- Une série de base, qui comprend toute la série hydrologique de 1961 à 2009 ;
- Une série sèche qui comprend seulement les années suivant 1980 ;
Cette baisse du débit est observée depuis les années 1980 sur toutes les rivières de cette partie du continent africain. Cette baisse est bien constatée sans que sa cause soit pour autant identifiée.
- Une série future qui partira des observations des dernières années (2000) pour un horizon de 50 ans et qui reflétera la variation projetée par le GIEC. Trois sous-séries futures seront alors établies : une moyenne, une haute (optimiste) et une basse (pessimiste).

3.2.1 Impact sur les précipitations

Le rapport de 2007 du GIEC sur les changements climatiques présente les projections pour la zone de l'Afrique de l'Ouest, les projections sur 100 ans correspondant au régime minimal, normal et maximum. Elles sont reprises dans le Tableau 3-3 ci-dessous.

Tableau 3-3 Projections pour l'Afrique de l'Ouest¹⁰

Afrique de l'Ouest (12S,20W à 22N,18E)													
Saison	Température (°C)					Précipitations (%)					Saisons extrêmes (%)		
	Min	25	50	75	Max	Min	25	50	75	Max	Chaudes	Humides	Sèches
Déc.-Jan.-Fév.	2,3	2,7	3,0	3,5	4,6	-16	-2	6	13	23	100	21	4
Mars.-Avr.-Mai	1,7	2,8	3,5	3,6	4,8	-11	-7	-3	5	11	100		
Juin-Juil.-Août	1,5	2,7	3,2	3,7	4,7	-18	-2	2	7	16	100	19	
Sept.-Oct.-Nov.	1,9	2,5	3,3	3,7	4,7	-12	0	1	10	15	100	15	
Moyenne annuelle	1,8	2,7	3,3	3,6	4,7	-9	-2	2	7	13	100	22	

Ces données sont fournies par trimestres. Ces projections ont été appliquées aux données pluviométriques des sous-bassins à l'étude. Sur une base annuelle et comparé au régime actuel, la série basse présente une baisse de 9%, la série moyenne présente une hausse de 2% et la série haute une hausse de 13%. Ces projections ont été converties en des projections sur 50 ans en utilisant une interpolation linéaire étant donné que les 50 prochaines années du productible de Gourbassi et de Manantali représentent une série suffisamment longue pour établir la rentabilité du projet. Au-delà de cette durée, l'effet de l'actualisation du productible est tel que l'impact en valeur nette est quasi négligeable.

3.2.2 Impact sur l'écoulement

Afin de transposer les projections climatiques de variation de pluviométrie sur leur impact sur le régime d'écoulement, une approche par sous-bassin a été utilisée. Pour chacun des sous-bassins faisant partie du réseau hydrographique à Bakel une relation pluie-ruissellement similaire à celle présentée à la Figure 3-1 pour le site de Gourbassi a été développée. Cette relation présente la corrélation pluie-ruissellement sur une base annuelle pour un sous-bassin. En utilisant l'équation linéaire établie, il est possible de transposer les variations du régime pluviométrique en variation du ruissellement. Les résultats obtenus sont présentés pour chacun des sous-bassins au Tableau 3-4 ci-après.

Tableau 3-4 Variation du régime hydrologique selon les projections de changements climatiques

Description	Minimum	50 ^e Percentile	Maximum
Pluie sur l'Afrique de l'Ouest - sur 100 ans	-14%	2%	16%
Pluie sur l'Afrique de l'Ouest - sur 50 ans	-7%	1%	8%
Ruissellement à Gourbassi - sur 50 ans	-20%	2%	22%
Ruissellement à Manantali - sur 50 ans	-14%	1%	16%
Ruissellement à Kayes - sur 50 ans	-7%	1%	8%
Ruissellement à Oulia - sur 50 ans	-12%	1%	14%

¹⁰ Source : *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, Chapter 11: Regional Climate Projections*, disponible sur <http://www.ipcc.ch>

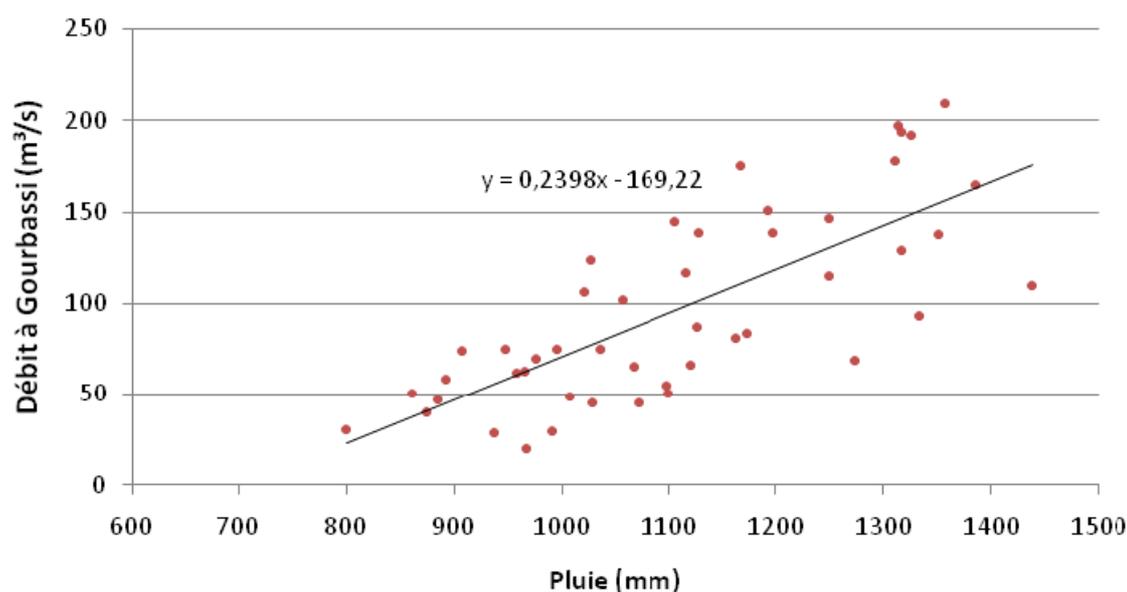


Figure 3-1 Corrélation pluie-ruissellement annuel pour le bassin de Gourbassi

3.3 MISE A JOUR DES BESOINS EN EAU

3.3.1 La zone d'étude

La zone d'étude pour l'analyse des besoins en eau s'étend de part et d'autre de la Falémé, entre sa confluence avec le fleuve Sénégal et l'extrémité amont du réservoir projeté, à la hauteur du pont de Moussala (route Saraya-Kéniéba).

Au Sénégal, elle couvre le Département de Bakel¹¹ dans la nouvelle Région administrative de Tambacounda et le Département de Saraya¹² dans la nouvelle Région de Kédougou¹³.

Au Mali, elle couvre les cercles de Kayes¹⁴ et de Kéniéba¹⁵ de la Région de Kayes.

¹¹ Arrondissements de Bélé (ex-Kidira), Kéniéba et Moudéry.

¹² Arrondissements de Bembou et Sabodala.

¹³ Les nouvelles régions de Tambacounda et de Kédougou sont nées de la scission de l'ancienne région de Tambacounda en 2008 ce qui a entraîné la création de nouveaux départements, arrondissements et de nouvelles communautés rurales.

¹⁴ Les communes de Falémé, Fégui, Tafacirga et Sadiola du Cercle de Kayes sont bordées à l'ouest par la Falémé.

¹⁵ Les communes de Dialafara, Kéniéba et Sitakily du Cercle de Kéniéba sont adjacentes à la Falémé dans la zone d'étude.

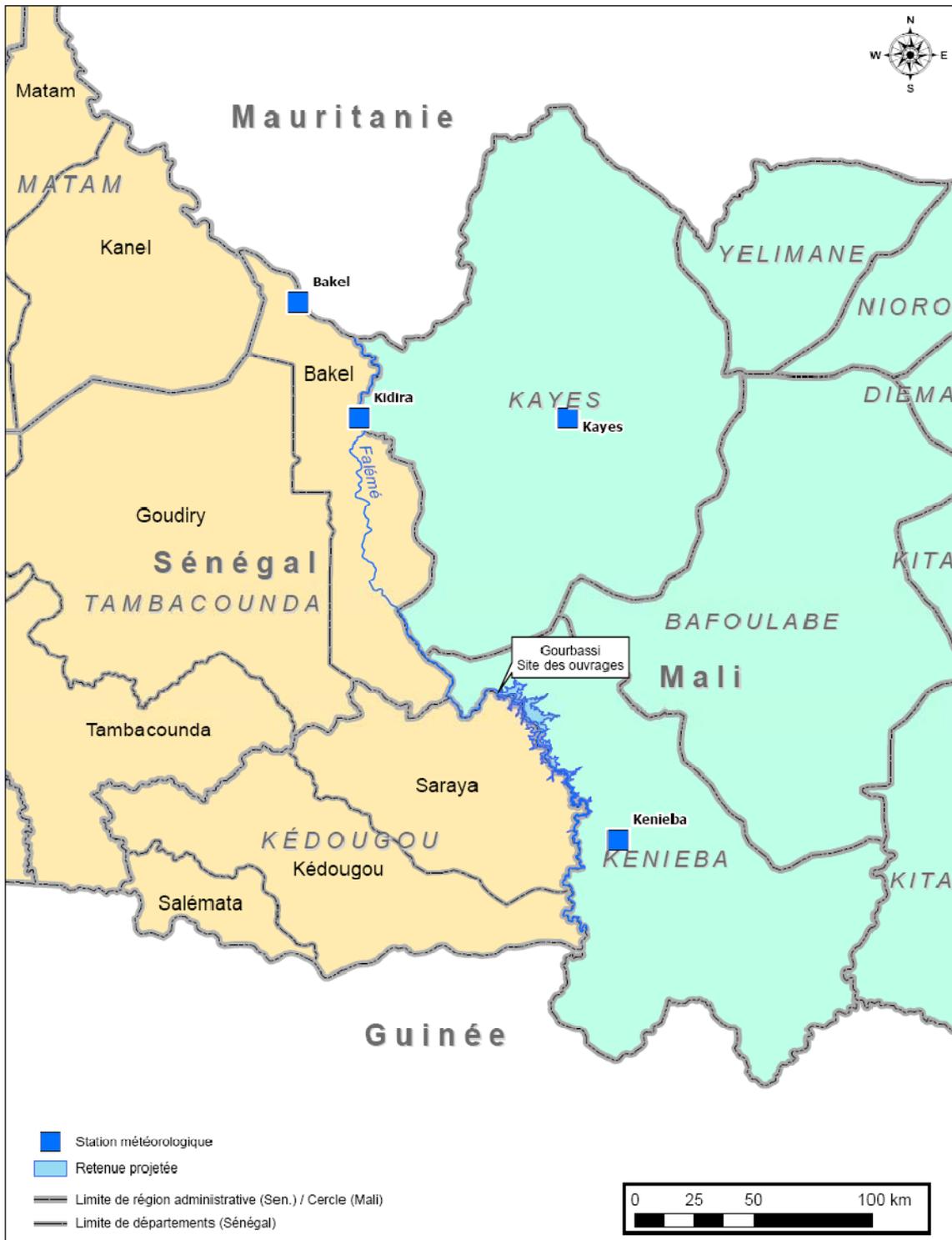


Figure 3-2 Carte administrative de la zone d'étude et stations météo

3.3.2 Considérations pour le calcul des besoins en eau pour l'agriculture

Les besoins nets en eau d'irrigation (I_{net}) expriment la quantité d'eau qui devra être apportée aux périmètres irrigués durant leurs cycles de production. Pour le calcul des

besoins nets en eau d'irrigation, le logiciel CROPWAT est utilisé. CROPWAT est un logiciel d'aide à la gestion de l'irrigation qui a été mis au point par la FAO, basé sur la formule de Penman-Monteith modifiée.

Il permet le calcul des besoins en eau des cultures et des quantités d'eau d'irrigation sur la base des Bulletins d'irrigation et de drainage FAO-24 et 33. Il offre également la possibilité de développer un calendrier d'irrigation en fonction de diverses pratiques culturales, et d'évaluer les effets du manque d'eau sur les cultures et l'efficacité de différentes pratiques d'irrigation.

Actuellement il en est à sa version CROPWAT sous Windows 8.0. CROPWAT est utilisé en association avec CLIMWAT de la FAO, une base de données climatique mondiale qui permet de calculer les besoins en eau des cultures, leur approvisionnement en eau et les calendriers d'irrigation, en référence à une série de stations climatologiques installées dans le monde entier.

Les besoins bruts en eau d'irrigation sont obtenus en majorant les besoins nets par les pertes d'eau inhérentes à l'irrigation et par l'eau nécessaire pour le contrôle de la salinité.

Les parts d'eau inhérentes à l'irrigation dépendent essentiellement de la méthode d'irrigation et de la nature et du type de régulations du réseau d'irrigation.

Les besoins en eau pour contrôle de la salinité dépendent essentiellement de la qualité d'eau d'irrigation, de la méthode d'irrigation, du type de culture et du type de précédent cultural (riz ou spéculiation maraîchère).

En hivernage à Bakel, les précipitations et les pertes inhérentes à l'irrigation seront suffisantes pendant cette saison pour contrôler le teneur en sels dans la zone racinaire.

Les calculs sont effectués en tenant compte des pertes et des gains d'eau par une source autre que l'irrigation :

$$I_{net} = (Pertes) - (Gains)$$

Les pertes d'eau sont constituées de l'évapotranspiration potentielle de la culture ($ET_{culture}$). En riziculture il faudra en plus tenir compte de l'eau nécessaire pour l'imbibition, pour l'établissement d'une lame d'eau, et pour remplacer l'eau perdue par percolation.

Les gains d'eau peuvent provenir de la précipitation, de la quantité d'eau stockée dans le sol et de la remontée à partir de la nappe phréatique. L'apport d'eau par remontée à partir de la nappe n'est pas pris en considération dans cette étude.

Un autre gain est constitué par l'eau stockée dans le sol en début de cycle. Mais dans la région du projet, avec les faibles pluies enregistrées et avec une forte évaporation, la probabilité d'avoir un stock d'eau dans la zone racinaire est quasi nulle.

De plus amples détails sur le calcul des besoins en eau avec le logiciel CROPWAT sont présentés en Annexe B.

3.3.3 Situation actuelle des superficies irriguées

3.3.3.1 Considérations agronomiques

Les systèmes de production

En raison des conditions climatiques, physiques et hydrographiques, il existe un système d'exploitation agricole dispersée et diversifiée comportant trois sous-systèmes de production. Ces trois sous-systèmes de production reposent sur la topographie et les conditions d'humidité des sols :

- 1) Culture pluviale (sur les hautes terres) ;
- 2) Culture de décrue ; et
- 3) Culture irriguée.

L'agriculture pluviale constitue le système de production agricole dominant, et permet de produire le mil, le sorgho, le niébé, le maïs et l'arachide.

Le développement de l'irrigation est assez limité vu son coût économique, l'entretien des terres que cela implique et surtout la pénurie de main-d'œuvre, les contraintes de la topographie et la résistance des exploitants agricoles.

Le Tableau 3-5 suivant fournit un aperçu général des systèmes d'exploitation dans les principales zones de production de la zone d'étude. Cette typologie de 1990 est encore celle d'aujourd'hui.

Tableau 3-5 Schémas des types d'exploitation agricole dans la Haute Vallée du fleuve Sénégal¹⁶

	Zone de Bakel/Gouraye	Zone de Falémé	Zone de Kayes
Population par ferme	15	9	13
Groupes ethniques prédominants	Soninke	Hal, Pulaar	Khassonke, Soninke, Bambara
Taille moy. Fermes (ha)	3,5	4,0	3,0
Exploitation (ha/ferme)	Agr. pluv.: 2,5 Walo : 0,7 Agr. irrig.: 0,3	Agr. pluv.: 3,8 Agr. irrig.: 0,2	Agr. pluv.: 2,4 Walo : 0,5 Agr. irrig.: 0,1
Répartition des cultures (ha/ferme)	Céréales : 2,2 Arach.: 0,5	Céréales : 2,2 Arach.: 0,5 Riz : 0,2	Céréales : 2,0 Arach.: 0,9 Légumes: 0,1
Pluviométrie (mm. moy.)	540	700	580

¹⁶ Source : [Réf. 4]

Les cultures irriguées

On notera que les périmètres irrigués du Mali sont généralement plus petits que ceux du Sénégal. De plus, ils ne bénéficient pas de la vulgarisation intensive et de l'aide à la gestion fournies par la SONADER en Mauritanie et la SAED au Sénégal. Ils sont en principe gérés au niveau du billage par un organisme du type coopérative et avec soutien de la part de la Direction régionale de l'agriculture (DRA) et des organismes publics.

Les productions maraîchères et fruitières irriguées sont essentiellement consommées localement. L'oignon occupe le plus de superficies ; il est suivi de la tomate, du chou et de la pomme de terre. Concernant les fruits, les mangues viennent en tête, suivies des agrumes et des bananes.

Au Mali, la production de riz dans la vallée du fleuve Sénégal doit être considérée à l'échelon de la région de Kayes. De 2002 à 2008, la proportion de la production régionale parmi les autres régions du pays n'a fait que baisser et la région importe du riz. La demande est forte et justifie l'extension de superficies pour répondre à la demande locale en riz et à l'exportation des fruits et légumes.

Il est toutefois à noter que dans la région de Kayes les cultures les plus fréquentes développées dans les sites non aménagés sont celles des produits maraîchers, du riz et du maïs, et à moindre échelle, du sorgho et l'arboriculture. En cas de transformation de ces sites en irrigation, les cultures maraîchères et la riziculture s'étendraient sur une surface plus grande ; par contre l'arboriculture et le sorgho verraient diminuer leur présence.

3.3.3.2 Les aptitudes du sol pour l'irrigation

L'aptitude d'une terre est l'adaptation qu'elle a pour un usage déterminé. Le classement de terres est généralement basé sur la classification USBR, sur la classification de la FAO et sur l'inventaire par télédétection des ressources ligneuses et de l'occupation agricole des terres.

3.3.3.3 Aménagements sur la Falémé au Sénégal

Il est intéressant de constater en premier lieu que les assolements ont peu changé et la superficie relative des cultures irriguées est comparable d'année en année. Le Tableau 3-6 montre que les superficies cultivées et assolements de 2010 sont comparables aux superficies cultivées et assolements pratiqués 20 ans auparavant.

Tableau 3-6 Comparaison des superficies historiques et assolement des cultures pluviales avec les superficies de 2010¹⁷

Département de Bakel		Riz	Mil	Sorgho	Maïs	Arach	Fonio	Bissap	Total	Céréales	% Céréales	
Pluvial	1985	1986	468	3 593	3 018	2 018	3 221	0	0	12 318	9 097	74%
	1986	1987	0	959	3 847	2 327	321	0	0	7 454	7 133	96%
	1987	1988	154	1240	4 114	1 115	1 417	0	0	8 040	6 623	82%
	1988	1989	1 889	5 450	9 230	3 223	1 192	0	0	20 984	19 792	94%
	TOTAL 1985-89		2 511	11 242	20 209	8 683	6 151	0	0	48 796	42 645	87%
	%		5%	23%	41%	18%	13%	0	0	100,0%	87,4%	87%
	1989	1990	1 404	2 665	10 793	3 444	3 900	0	0	22 206	18 306	82%
	%	6%	12%	49%	16%	18%	0%	0%	100,0%			
Département de Bakel		Riz	Mil	Sorgho	Maïs	Arach	Fonio	Bissap	Total	Céréales	% Céréales	
Pluvial	2009	2010	186	3 371	3 383	3 238	2 104	0	83	12 282	10 178	83%
	%		2%	27%	28%	26%	17%	0%	0%	100,0%		
	ASSUME		6%	20%	37%	20%	17%			100,0%		
Falémé - Cercle de Kayes		Riz Récolté	Mil	Sorgho	Maïs	Arach	Fonio		Total	Céréales	% Céréales	
Pluvial	2009	2010	200	600	1 010	950	760	25		3 545	2 760	78%
	%		6%	17%	28%	27%	21%	1%		100%		

Cette comparaison est plus difficile du côté des cultures irriguées.

Dans la zone des trois frontières (triangle Bakel-Kayes-Sélibabi), l'horticulture constitue une activité en plein développement se démarquant des autres activités agricoles en crise (élevage, cultures pluviales). L'activité maraîchère est la plus ancienne, la plus importante et la mieux organisée à Bakel et à Kayes. La production se situe surtout pour l'instant le long du fleuve Sénégal et près de la confluence de la Falémé avec le fleuve Sénégal.

La production se concentre en saison sèche froide et un nombre limité de cultures dominant : l'oignon (en très forte progression), le chou pommé, le piment. Lors de la saison sèche froide, Bakel et Kayes ont une production excédentaire alors que pour Sélibabi la plupart des légumes proviennent toujours des zones frontalières.

Le Tableau 3-7 montre les superficies irriguées relatives durant la période de 1988 à 1993.

Nous notons durant cette période pour le Département de Bakel que les superficies pluviales ont varié entre 25 000 et 37 000 ha et que les superficies maximales aménagées pour cultures irriguées étaient dans l'ordre de 5 à 8% (5,6% et 8,6%). La superficie maximale aménagée pour cultures irriguées fut de 2150 ha en 1990 mais la superficie relative actuellement exploitée (ou récoltée) variait entre 57% et 70%. Cette valeur est en accord avec celle de 55% obtenue pour l'ensemble du fleuve Sénégal.

¹⁷ Source : DRDR Bakel

Tableau 3-7 Surfaces des cultures pluviales et irriguées – Département de Bakel¹⁸

Superficie cultivable min (ha)	25 000	A		
Superficie cultivable max (ha)	37 000	B		
Superficie maximale aménagée pour cultures irriguées (ha)	2 000	C	2150	
% maximal de la superficie cultivable du Département de Bakel qui est aménagée pour cultures irriguées.	5,6%	D/A	8,6%	
Superficie maximale exploitée pour cultures irriguées (ha)	1 400	D	1 395	1 230
% de la superficie aménagée pour cultures irriguées et qui est exploitée	70,0%	D/C	64,9%	57,2%
Période	1988-1992		1990	1993

Les cultures pratiquées en irrigation dans la zone de Bakel sont par ordre d'importance : le riz, le sorgho, le maïs et dans des proportions moindres, les cultures maraîchères.

Du côté du Sénégal, selon les informations recueillies, il n'y aurait que 200 ha en cours d'aménagement sur la Falémé en aval de Gourbassi.

En résumé nous distinguerons en premier lieu deux époques de culture dans les périmètres irrigués. La contre-saison chaude sera explorée si les besoins en eau des cultures irriguées en hivernage et en contre-saison froide ne sont pas excessifs laissant croire que la gestion du barrage le permet. On verra que la mouille de Balou-Djimbé offre un potentiel de culture en contre-saison chaude.

L'hivernage

Les emblavures débutent en général dans la troisième décennie du mois de juin pour le maïs et le sorgho et dans la première quinzaine de juillet pour le riz et se poursuivent jusqu'à mi-septembre. La récolte est exécutée fin octobre mi-novembre.

La contre-saison froide

Le semis s'effectue au cours de la période allant de mi-octobre à novembre pour les cultures de céréales (maïs et sorgho) et de novembre à janvier pour les cultures maraîchères. La récolte se fait entre février et avril.

Le riz : Il est cultivé essentiellement pendant l'hivernage. La principale variété utilisée est la JAYA (90%).

Le maïs : Il est cultivé en hivernage et en contre-saison froide avec des variétés locales.

Le sorgho : Il est également cultivé en hivernage et en contre-saison froide dans les mêmes conditions que le maïs avec une prédominance des variétés locales (Felale, variété à cycle court et Niobogan).

¹⁸ Source : [Réf. 30]

3.3.3.4 Aménagements sur la Falémé au Mali

Les zones liées à l'irrigation dans la Région de Kayes sont divisées en zones irriguées (Sites Aménagés – SAM) et en zones à potentiel d'irrigation (Sites Non Aménagés – SNA ou Sites Aménageables).

Selon l'information des SAM obtenue dans le cadre des enquêtes décrites dans le Schéma Directeur d'Irrigation de la Région de Kayes la superficie irriguée dans la Région de Kayes atteint 4 827 ha sur un total de 187 sites [Réf. 19].

Tableau 3-8 Sites aménagés dans la région de Kayes 2009-2010

Cercle	Surface SAM	Nombre de SAM	Taille moyenne de SAM (ha)
Bafoulabé	1 779	20	88,8
Diéma	292	54	5,4
Kayes	889	29	30,7
Kéniéba	67	7	9,6
Kita	543	29	18,7
Nioro	139	30	4,6
Yélimané	1 121	18	62,3
Région de Kayes	4 827	187	25,8

Situation actuelle dans le cercle de Kayes

Les SAM et les SNA du Cercle de Kayes se regroupent d'une part autour du fleuve Sénégal et de ses affluents le Colombine, le Karakoro et la Falémé et d'autre part autour des bas-fonds et plaines comme Holonkaré et le prolongement du lac Magui.

Il est à noter que selon la liste des SAM de la DNGR à Kayes, il y a 29 SAM en 12 communes, qui occupent un total de 889 ha. Selon l'information recueillie lors de la campagne de terrain réalisée pour le Schéma Directeur d'Irrigation de la Région de Kayes, 24 SAM ont été trouvés, répartis sur 11 communes, qui occupent 96 ha [Réf. 19].

45% des types d'aménagements hydro agricoles (TAHA) du Cercle de Kayes sont des périmètres maraîchers, 42% sont des périmètres irrigués villageois (PIV) et 13% sont des bas-fonds.

66% des SAM se trouvent sur des sols à bonne aptitude pour l'irrigation, 34% se trouvant sur des sols non aptes pour la culture en irrigation. Il est tout de même intéressant de constater que le tiers des cultures irriguées se fait en sols non aptes pour la culture d'irrigation.

La source d'eau principale des SAM de Kayes sont les cours d'eau : 64% des périmètres d'irrigation tire l'eau de ces derniers, 28% des eaux de ruissellement et seulement 8% utilise des eaux souterraines.

Tableau 3-9 Principaux cours d'eau du Cercle de Kayes

Cercle	Cours d'eau	Débit considéré (m ³ /s)	Longueur dans la région (km)	% sur la base longueur	Débit moyen (m ³ /s)	% sur la base des débits
Kayes	Sénégal	632 à 464	669	64%	548	81%
	Colimbiné	9,52	115	11%	9,52	1%
	Karakoro	n.d.	120	11%	Exclus	
	Falemé	115	140	13%	115	17%
	Total excluant Karakoro			1 044	100%	672,52	100%

La source d'eau utilisée varie en fonction de la typologie d'irrigation. Dans les périmètres irrigués villageois de Kayes, l'eau pour l'irrigation provient fondamentalement des cours d'eau, et à moindre échelle des eaux de ruissellement. Également, dans les périmètres maraîchers, la source principale d'eau vient des cours d'eau, bien qu'une partie non négligeable d'entre eux utilise de l'eau souterraine, et à moindre échelle, des eaux de ruissellement. Par contre, dans les bas-fonds, les eaux mises en œuvre proviennent des eaux de ruissellement.

En prévision d'un futur développement de zones potentielles pour l'irrigation, le résultat des enquêtes montre que dans les zones potentiellement irrigables dans le Cercle de Kayes on observe que la source majoritaire d'eau disponible est l'eau de ruissellement (67%), puis l'eau en provenance des cours d'eau (22%) et en dernier lieu les eaux souterraines (11%).

Les maraîchages sont cultivés dans les périmètres maraîchers, dans les périmètres irrigués villageois et dans les bas-fonds. Il ne faut pas toutefois exclure la possibilité de cultiver le riz ailleurs que dans les bas-fonds et en sols plus perméables. Non seulement de par le constat qu'un tiers des cultures irriguées se trouve en sols non aptes pour l'irrigation mais du fait que cette éventualité est une réalité historique bien connue sur la rive gauche du fleuve Sénégal comme en témoigne Diemer et Van der Laan (1987) :

« Depuis 1820 (à 1987), il ne s'est présenté qu'un seul succès indubitable : celui des petits périmètres irrigués. Ceux-ci ont comme particularité technique qu'ils reposent sur une formule qu'aucun technicien agricole n'imaginerait : cultiver le riz sur un sol sableux, et cela dans l'aride Sahel. Cette proposition décisive n'émana pas des services techniques mais du Service de la Coopérative. »¹⁹

Situation dans le Cercle de Kéniéba

D'après la liste de SAM de la DNGR, il y a à Kéniéba 7 SAM en 4 communes, qui occupent un total de 67 ha.

Les types d'aménagements hydro agricoles trouvés sont les suivants :

-  Périmètre maraîcher ;
-  Submersion contrôlée (bas-fonds) ;

¹⁹ Source : Diemer G et Van der Laan E, *Irriguer pour Subsister*, 1987

 Submersion contrôlée (plaine).

60% des TAHA de Kéniéba sont des bas-fonds, et 40% sont répartis de façon égale entre périmètres maraîchers et plaines. À Kéniéba les périmètres maraîchers tirent leur eau de l'eau souterraine alors que les bas-fonds et les plaines sont irrigués à partir de l'eau de la Falémé.

Il n'y a pas de données concernant l'aptitude des terres des sites aménagés de Kéniéba. Il y a 81 SNA à Kéniéba inventoriés par la DNGR sur 2 688 ha, desquels seulement 2 sites aménageables de 2 communes ont été visités : Kéniéba, avec possibilité de transformation en irrigation à l'aide d'un bas-fond ; et la commune de Sitakily, avec option de créer une plaine.

3.3.4 Superficie potentielle en irrigation

3.3.4.1 Cercle de Kayes

La contribution potentielle de la Falémé pour les aménagements de cultures irriguées lorsque qu'estimée sur la longueur relative de la rivière (voir Tableau 3-9) est d'environ 13% du total des apports possibles des cours d'eau du Cercle de Kayes. Lorsqu'estimé sur la base des débits la contribution potentielle de la Falémé augmente à 17% et celle du fleuve à 81%.

Cet estimé ne tient pas compte de la contribution du ruisseau Karakoro car aucune donnée de débit n'est disponible. La contribution de la Colimbiné devient moins de 2% ce qui est compréhensible du fait que ce cours d'eau et son affluent Kanarou sont stationnaires et coulent de juin à février, avec un volume apporté de l'ordre de 218 000 m³ par an alors que la Falémé s'écoulant de juin à avril peut apporter environ 2,15 millions de m³ par an selon la station hydrométrique de Gourbassi.

Cette contribution de 17% du total est quelque peu inférieure à la contribution moyenne de la Falémé au débit du fleuve à Bakel qui était de 19% pour la période de 1952 à 1984. Une contribution de 19% est donc retenue. Il est à noter qu'en plus du fleuve Sénégal et de ses affluents, il existe également à Kayes des ressources hydriques superficielles non permanentes. Pour le cercle de Kayes c'est le cas de la mare de Doro. Nous verrons plus loin une contribution potentielle importante de la Falémé au niveau des mouilles.

Considérant une contribution de la Falémé de 19% du débit du fleuve à Bakel, que la contribution des cours d'eau comme source d'eau est de 22%, nous obtenons un potentiel pour le Cercle de Kayes d'environ $31\,287\text{ ha} * 0,22 * 0,19 = 1307\text{ ha}$.

En novembre 2009, l'OMVS rapporte que dans le cas du Mali, les superficies aménagées dans la vallée du fleuve Sénégal semblent être restées à leur valeur de 2002, c'est-à-dire 710 ha [Réf. 15]. Sur ces 710 ha, seulement 227 ha cultivés par des privés sont mis en valeur. Dans ce document d'étude portant sur l'élaboration du plan d'action régional pour l'amélioration des cultures irriguées dans le bassin du fleuve Sénégal, deux plans sont distingués : un plan à court et moyen terme (2010-2015) et un plan à long terme (2015-2025). La partie malienne estime devoir revoir à la hausse son potentiel d'irrigation et ainsi passer de 5 000 à 12 000 ha irrigués environ. En plus des

710 ha pris en compte actuellement, la progression jusqu'en 2015 (moyen terme) serait de 4 500 ha et de 7 500 ha pour le long terme.

Considérant l'apport de 19% de la Falémé au débit du fleuve à Bakel, nous obtenons alors une superficie potentielle de $7\,500 \text{ ha} * 0,19 = 1\,425 \text{ ha}$.

Ce potentiel est environ 8,2% supérieur au potentiel estimé à partir des données du Plan Directeur [Réf. 19].

Quant à la situation actuelle, des 889 ha de SAM recensés on peut estimer une superficie aménagée de $889 \text{ ha} * 0,22 * 0,19 = 37 \text{ ha}$. Cela n'est pas loin de la réalité ; dans le cas présent seuls deux sites seront aménagés par le PGIRE soient à Gouthioubé (20 ha) et à Fégui (25 ha). Le PGIRE prévoit d'accroître ces superficies sans préciser de combien.

Les sites aménagés pour cultures irriguées à même la Falémé sont pratiquement limités à trois aménagements entre la confluence et Kidira dans le Cercle de Kayes.

Il est clair toutefois que le potentiel réel de superficies irriguées à partir de la Falémé dépasse largement ces superficies et doit être pris en compte pour la survie même de la population. Le déficit céréalier de la Région de Kayes ne permet pas d'ignorer le potentiel de la Falémé. De plus, la quasi totalité de la population active de la Région de Kayes est consacrée à l'agriculture et tant les hommes que les femmes ont comme principal moyen de subsistance cette activité. Le développement économique de la Région et, par conséquence la sécurité alimentaire et l'amélioration de la qualité de vie, sont soumis au succès du secteur agricole

Ce fait n'empêche pas moins de la part des Autorités maliennes de présenter une sous-estimation des besoins en eau pour fins d'irrigation et devant être comblés par les eaux de la Falémé.

En effet, la DRA estime les besoins en eau pour fins d'irrigation comme suit :

Tableau 3-10 Sites potentiels pour cultures irriguées identifiés par la DRA

Commune rurale	Superficie à aménager pour cultures irriguées (ha)
Gouthioubé	150
Sangalou	60
Fégui	60
Total	270

3.3.4.2 Sangalou et Gouthioubé

Sangalou et Gouthioubé se situent sur la rive droite de la Falémé. Gouthioubé est au confluent avec le fleuve Sénégal. Sangalou se situe à 5 kilomètres en amont. Le déboisement a été rapide au cours des dernières décennies : les hommes de 60 ans se rappellent que dans leur enfance le village était entouré de forêt et qu'ils n'osaient pas sortir la nuit par peur des bêtes sauvages. Comme dans les autres villages de la région, la migration joue un grand rôle.

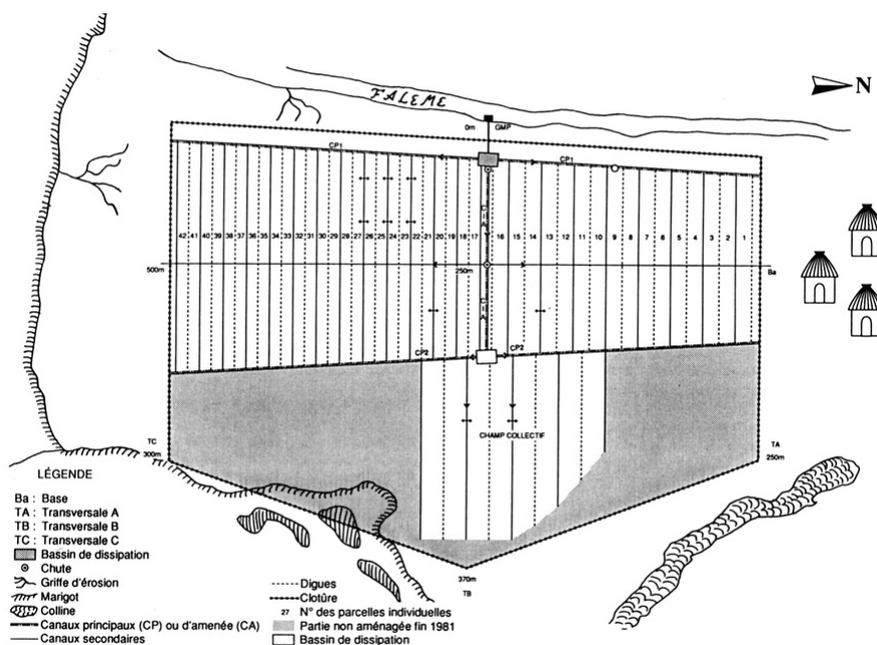


Figure 3-3 Plan d'ensemble du périmètre de Sangalou²⁰

Les types d'unités de production ont des stratégies différentes d'investissement sur le périmètre. Les uns cherchent à sécuriser la production céréalière et à diversifier leur production grâce au maraîchage de rente, d'autres à intensifier la riziculture, d'autres encore à cultiver le riz de façon plus ou moins extensive. Les stratégies de production découlent en partie des stratégies économiques. Le groupe majoritaire a opté pour la sécurisation. Un petit nombre d'exploitations (12% sur l'échantillon) pratique la culture intensive.

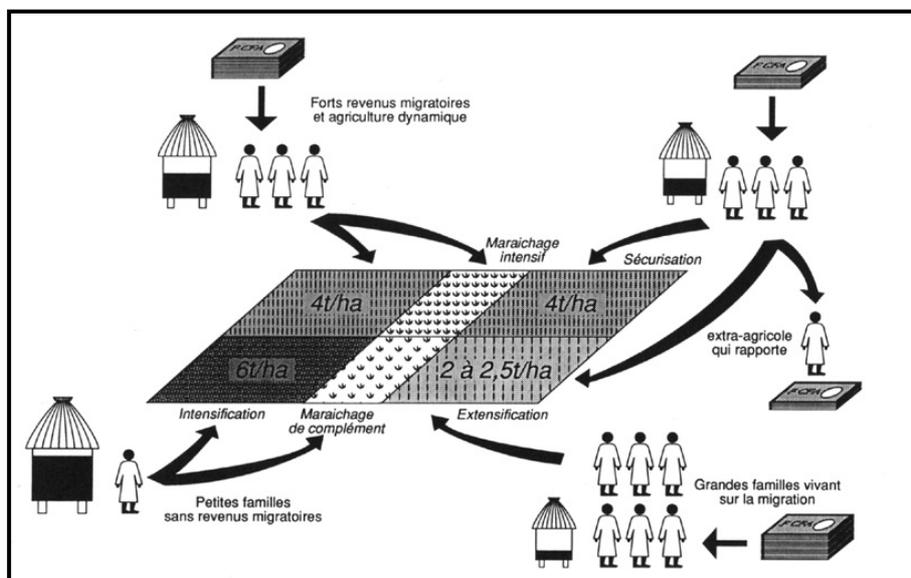


Figure 3-4 Les types d'exploitation à Gouthioubé²¹

²⁰ Source : [Réf. 8]

²¹ Source : [Réf. 8]

A Gouthioubé, toutes les familles pratiquent le maraîchage, en brousse, sur falo ou sur le périmètre. Seules quelques-unes ont des ventes importantes.

3.3.4.3 La plaine de Moussala

La DRA de Kayes a fait valoir que la plaine de Moussala présentait un potentiel important et que son exploitation est stratégique. Notre rencontre avec la Direction Nationale nous permet de dresser un tableau global des superficies potentielles qui résume la planification du côté malien.

Tableau 3-11 Superficies potentielles prioritaires selon planification Malienne²²

Village associé	Superficie (ha)	Latitude	Longitude
Gouthioubé	150	14,7571	-12,2297
Sangalou	60	14,7200	-12,2081
Fégui	60	14,6212	-12,1483
Moussala	1 800	13,6863	-12,0486
Kéniékéniéba	30	13,3748	-11,8652
Gorbou	50	12,8328	-11,3867
TOTAL	2 150		

3.3.5 Cultures de décrue

L'agriculture de décrue se pratique au moment où les eaux se retirent après une période d'inondation. Elle cherche à profiter des réserves en eau du sol constituées suite à l'inondation. Elle se déroule donc toujours en fin de saison pluvieuse.

En bref, la culture de décrue dans la zone du projet consiste à utiliser l'humidité résiduelle subsistant dans les sols alluviaux après la décrue. On en retire un avantage certain comme les terres de culture de décrue sont submergées (30-40 jours) pendant la saison où les mauvaises herbes poussent le plus, les longs travaux de sarclage s'en trouvent réduits d'autant. La récolte se trouve également repoussée bien avant dans la saison sèche.

Les premières parcelles qui sont les plus élevées produisent aussi les premières. Les plantes y consomment l'eau emmagasinée dans le sol. Il faut cependant que les plantes semées aient des cycles végétatifs assez courts puisque les réserves d'eau du sol ne seront pas ou peu remplacées avant l'achèvement de leur cycle végétatif.

Le système agricole de décrue est basé sur l'irrigation et la fertilisation naturelles des plaines alluviales. Le sorgho, le haricot et le melon sont cultivés à partir de l'humidité résiduelle du sol après les inondations annuelles pendant les mois d'août et de septembre. L'agriculture de décrue ne requiert pas d'intrants contrôlables autre que l'accès à la terre et à la main d'œuvre et présente ainsi un grand bénéfice net en termes de coût énergétique.

S'il est vrai que le rendement de la main d'œuvre ainsi que le revenu net de l'agriculture irriguée, exigeante en intrants, est de loin plus important que ceux de l'agriculture de

²² Source : DRA Kayes et DNA

décru, la production de l'agriculture de décrue demeure néanmoins très importante pour la subsistance des ménages dont les besoins alimentaires ne peuvent être satisfaits par la seule agriculture irriguée.

La production provenant des cultures de décrue destinées à la consommation locale contribue à assurer la sécurité alimentaire des populations de la zone d'étude : dans cette partie du pays où la pluviométrie pose parfois problème, les populations se ruent sur les cultures de décrue quand l'hivernage ne marche pas.

Selon le service départemental du développement rural, des variétés comme le maïs, le niébé, la patate sont cultivées le long du fleuve Sénégal, de la Falémé et des mares pérennes et la production est essentiellement consommée localement.

Dans le Département de Bakel, la culture de décrue s'étend d'Aroundou, à Gandé dans l'arrondissement de Moudéry, où la culture des trois principales variétés que sont le maïs, la patate et le niébé, démarre au mois d'octobre, coïncidant avec le début du retrait des eaux du fleuve, en général pour s'achever au mois d'avril.

À l'aval de la Falémé, l'absence de crue de la rivière et la rapidité de vidange dans le fleuve Sénégal dues en partie à la pluviométrie plus faible mais aussi à la régulation artificielle du fleuve, ont causé des dégradations majeures des berges. Ce phénomène se prolonge par une érosion régressive remontant les vallées latérales qui stérilise des surfaces considérables de sols autrefois cultivés en décrue. L'évolution est extrêmement rapide, les ravines pouvant avancer de plusieurs mètres par années et détruire routes, cimetières, périmètres irrigués et parfois des habitations.

L'enthousiasme des agriculteurs pour les cultures de décrue tient, entre autres, à la faible performance des cultures sous pluie, au coût élevé de l'eau des aménagements d'irrigation et au coût très faible des investissements (pas d'engrais, pas de labours, pas de coût d'irrigation) en décrue. Ainsi, des spéculations comme le maïs, la patate et le niébé occupent 5374 ha (en 2009) de la zone dite de décrue dans les vallées du fleuve Sénégal, de Aroundou jusqu'à Gandé, et de la Falémé de Citabanta à Aroundou où les deux lits se rejoignent.

Malgré cet engouement, les cultures de décrue pratiquées le long du fleuve Sénégal et de la Falémé ont longtemps été marginalisées dans le cadre des enquêtes agricoles, alors que cela peut occuper une population totale de 192 525 âmes dont 94 221 hommes et 98 301 femmes, composée en majorité de jeunes. Les superficies emblavées sont de 4539 ha pour le maïs, 711 ha en patate et 124 ha en niébé. Le maïs constitue ainsi 84,5% des emblavures. Cela explique la place qu'occupe cette céréale dans les habitudes alimentaires des populations comparativement aux autres spéculations : la patate 13%, et enfin le niébé 2,5%

Les dernières enquêtes réalisées pendant la décrue 2000-2001 (SAED) montrent qu'une submersion de 25 jours est suffisante pour assurer un rendement correct de récolte en décrue. Jusqu'à nouvel ordre il est recommandé d'utiliser ce seuil pour les points les plus hauts des zones cultivables.

Les rives de la Falémé dans la zone du futur réservoir présentent un relief avantageux pour la culture de décrue en ses rives. Il est possible que la baisse du niveau du réservoir et le retrait des eaux puisse générer des conditions favorables à la culture de décrue. Cette possibilité devra être examinée avec sérieux lors des études ultérieures

en phase APD car elle pourrait générer une activité agricole de valeur pour les populations qui seront déplacées et pour lesquelles il faudra trouver des terres cultivables. Pour étudier cette option il faut disposer d'un lever topographique de précision de la zone inondable qui pourrait être avantageusement produit par des relevés LiDAR avec prises de vues aériennes numériques.

La moyenne Falémé, aux environs de Satadougo, est particulièrement marquée par le développement d'une basse terrasse (voir Figure 3-5 ci-dessous).

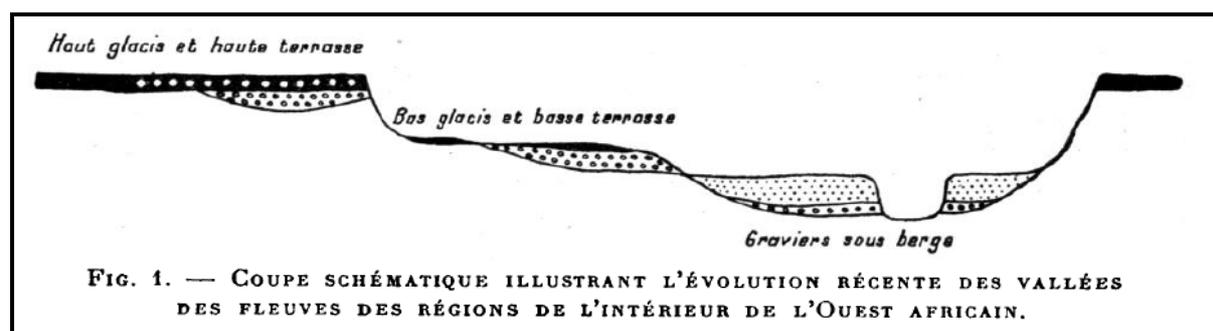


Figure 3-5 Coupe schématique illustrant l'évolution récente des vallées des fleuves des régions de l'intérieur de l'Ouest Africain²³

La basse terrasse est généralement très large, souvent de l'ordre du kilomètre et plus, de sorte que les méandres des entailles ultérieures s'inscrivent dans ses limites. Dominant la plaine d'inondation des fleuves, la basse terrasse a été choisie pour l'installation de nombreux villages. En général, elle domine nettement les flats de la plaine d'inondation par un talus de hauteur et de pente très variables, parfois jonché de galets.

Quant aux graviers ils sont recouverts d'une grande épaisseur de sables et de limons. Exceptionnellement, en particulier au pied des grands reliefs tels que la falaise de Tambaoura, ce remblaiement montre, vers le sommet, quelques lentilles de graviers de petit calibre. Les limons et les sables peuvent atteindre une épaisseur d'une dizaine de mètres et ils montent parfois jusqu'au niveau de la basse terrasse qu'ils masquent en partie. Mais, le plus souvent, les graviers sont visibles aux basses eaux. D'un bief à l'autre, ils affleurent « sous berge » au niveau de l'eau ou le dominant de 2 ou 3 m.

Les affluents de droite de la Falémé montrent deux phases de creusement, l'une subactuelle, l'autre actuelle : une première entaille s'attaque au remblaiement sans atteindre les alluvions grossières, mais elle est bientôt comblée, principalement par des matériaux fins, exceptionnellement par quelques lentilles de graviers. Quelques vallées sèches, occupées par des rizières, signalent cette phase dans la région de Kéniéba. L'entaille actuelle s'attaque non seulement au remblaiement subactuel, mais aussi aux sables et limons, découvrant ainsi les graviers sous berge.

²³ Source : [Réf. 1]

3.3.6 La mouille de Balou-Djimbé

Les leviers topographiques de la Falémé de la confluence à Sitabanta (au kilomètre 105 en amont de la confluence) tels que réalisés par Louis Berger Intl en 1980 ont permis d'identifier 7 mouilles dans le secteur de Balou à Sénédebou et 4 mouilles dans le secteur de Sénédebou à G.B Samba. La mouille de Balou-Djimbé est de loin la plus intéressante (cf. Planche Go13 en Annexe A).

Tableau 3-12 La mouille de Balou-Djimbé et son potentiel²⁴

La Mouille de Balou-Djimbé	Mars	Avril	Mai	Juin
Pluie Quinq Sèche de Bakel	0	0	0	35
Évaporation - Précipitation (mm/mois.)	351,5	403,9	352,3	297,4
Évaporation - Précipitation (mm/jour)	11,3	13,5	11,4	9,9
mm/s	1,31E-07	1,56E-07	1,32E-07	1,15E-07
100%	1,31E-07	1,56E-07	1,32E-07	1,15E-07
Largeur moyenne d'écoulement	100,000	100	100	100
Longueur d'écoulement (m)	37 600	37 600	37 600	37 600
Pertes par évaporation (m³/s)	0,5	0,6	0,5	0,4
Pertes par évaporation (m³/jour)	42 634	50 622	42 731	37 274
Jours	31	30	31	30
Pertes par évaporation (m³)	1 321 640	1 518 664	1 324 648	1 118 224
Pertes cumulatives par évaporation (m³)	1 321 640	2 840 304	4 164 952	5 283 176
Pertes cumulatives en % du Vol. initial	15%	32%	47%	59%
Volume en m ³	8 900 000	7 578 360	6 059 696	4 735 048
Superficie en m ²	3 760 000	3 760 000	3 760 000	3 760 000
Profondeur	2,367	2,0155213	1,61162128	1,25932128
Volume moyen	6 258 412			
Pâturage irrigation (m ³ /ha)	14 000			
Superficie pâturage intensif	447			

Elle a une capacité de 8,91 hm³ et une superficie de 3,76. Cette mouille qui en 1980 a dû cesser le 10 mars était pratiquement vide à la fin des études citées par Louis Berger Intl. Pendant 70 à 72 jours, à raison de 9 mm/j elle a évaporé 2,4 hm³, laissant un solde de 6,51 hm³. Ce volume a par la suite percolé hors de la mouille avant l'apparition des pluies [Réf. 11].

Les irrigations ont porté sur 60 ha de maïs pendant la contre-saison froide 1980. Louis Berger Intl évalue les prélèvements de ces 60 ha à environ 0,3 hm³. Un solde de 6,21 hm³ apparaît. La cote du seuil de Balou est de 14,5 m. Au 10 mars la cote du plan d'eau du fleuve Sénégal à la confluence avec la Falémé (environ 2 km plus à l'aval) était voisine de 13,3 m puis est descendue à 13,1 m. Sous cette charge (14,5 -13,1 = 1,4 m) un volume de 6 à 7 hm³ a percolé hors de la mouille, ce qui suppose une section importante et des perméabilités élevées.

Une investigation spécifique de ce point est importante car ces 6 hm³ disponibles à la fin mars pourraient permettre d'irriguer une superficie importante en contre-saison chaude dans les zones particulièrement actives de Balou à Djimbé. À titre d'exemple ce volume d'eau pourrait irriguer plus de 400 ha de pâturage intensif. Ce calcul prend en compte

²⁴ Source : Calculé à partir des données de périmètres irrigués villageois de Bakel [Réf. 11].

les pertes par évaporation et suppose une irrigation de mars à juin inclusivement. La saison des pluies viendrait poursuivre l'apport d'eau et permettre une production soutenue jusqu'en octobre.

Il faut garder à l'esprit toutefois que ce stockage potentiel n'est possible que si un ouvrage est construit pour retenir les pertes par percolation et la faisabilité économique d'un tel aménagement n'est pas chose évidente.

3.3.7 L'élevage

L'importance et la diversification du cheptel fait de la région de Tambacounda le grenier à viande du Sénégal. En effet, si on consomme en moyenne dans la région de Dakar 300 bovins par jour, alors que la région de Tambacounda achemine 3000 à 4000 bovins par mois à Dakar, 1 animal sur 3 abattus dans les abattoirs de Dakar provient de la région de Tambacounda.

La région de Tambacounda compte 3 zones écologiques pastorales :

- Au nord du chemin de fer on note une zone sahéenne correspondant au Ferlo du Sénégal oriental ;
- Au sud du chemin de fer il y a la zone soudano-guinéenne ;
- Entre ces deux zones, de part et d'autre du chemin de fer, il y a la zone intermédiaire sahélo-soudanienne.

Dans la zone nord jusqu'à Bakel, on rencontre le Zébu peul sénégalais communément appelé Gobra, les moutons peul et la chèvre du Sahel. Dans la zone soudano-guinéenne, on rencontre le Taurin Ndama, le mouton et la chèvre Djollonké. Dans la zone sahélo-soudanienne on rencontre le Diokoré (métis Zébu et le Ndama) et le Walaré (métis mouton peul et mouton Djollonké).

Le cheval : on le trouve dans la zone sahélo-soudanienne, dans les limites du département de Tambacounda.

L'âne : on le trouve dans toutes les trois zones mais beaucoup plus dans le nord de la région et de part et d'autre du chemin de fer.

Dans la région de Kayes, l'élevage est de deux types : sédentaire et transhumant (locaux et exogène). Les animaux transhumants fréquentent la zone par milliers de têtes migrant vers la Guinée. Ils perturbent les écosystèmes naturels et sont à la base de conflits entre éleveurs et agriculteurs. Le cheptel de la zone est essentiellement composé de bovins, ovins, caprins, équins, camelins et volaille.

L'élevage sédentaire est l'activité principale des Peuls et porte sur les ruminants (bovins de la race N'dama, ovins, caprins de petite taille). Ces animaux sont en divagation pendant toute la saison sèche. Le bétail est désormais plus intégré aux systèmes agricoles, principalement par les agriculteurs qui se procurent des animaux, réduisant ainsi l'accès des pasteurs nomades aux ressources en produits alimentaires agricoles. Cette évolution récente, en faveur des pâturages en des points déterminés a par contre contribué à une érosion importante autour des villages et des points d'eau.

Les principales contraintes à la production de bétail, dans la zone d'étude, résident dans l'alimentation et l'accès à l'eau, en saison sèche. En principe, les troupeaux passent sur la partie méridionale de la transhumance une fois que les exploitants agricoles sédentaires ont fini de moissonner leurs récoltes de céréales pluviales, en particulier le sorgho et le millet.

Si les pâturages pluviaux (ou diéré) et les trous d'eau s'assèchent avant que les exploitants agricoles n'aient achevé leur moisson, l'arrivée précoce des animaux cause des dommages aux récoltes et engendre des conflits entre les gardiens d'animaux et les exploitations agricoles. Les champs de décrue (ou walo) et les pâturages, y compris les bourgoutières, sont importants car ils servent de tampon entre les parcours pluviaux et les parcelles cultivées.

Traditionnellement, les pasteurs nomades s'accordaient avec les exploitants agricoles pour conserver leur bétail sur les champs moissonnés des exploitations agricoles pendant une durée précise. En contrepartie, les champs des exploitants agricoles étaient fertilisés et, dans certains cas, les exploitants agricoles recevaient de petits ruminants ou des veaux en rémunération pour l'accès à leurs ressources en pâturages. Cette source de fourrages en saison sèche était importante pour les gardiens d'animaux nomades mais la contribution que faisaient les animaux aux modes d'exploitation agricole était également fort appréciée des exploitants agricoles sédentaires.

L'approvisionnement en eau du bétail ne pose aucun problème pendant l'hivernage. Il est par contre difficile pendant la saison sèche à cause du tarissement précoce des points d'eau surtout au Nord de la voie ferrée Tambacounda-Kidira.

La préservation de zones importantes de fourrage le long de la Falémé, en prévision de la saison sèche et des périodes de sécheresse, constitue également la clé du développement de l'exploitation durable du bétail dans la zone du projet. Le développement de systèmes d'irrigation contribuera à améliorer ce processus en augmentant la quantité de résidus de récolte disponible.

En 1994 on concluait que sur la base des ressources alimentaires disponibles, il faudrait fixer la taille du cheptel dans la zone du nord (nord de la voie ferrée Tambacounda-Kidira) aux environs de 20 000 – 21 000 UBT, et dans la région au sud à environ 50 000 UBT, avec un maximum de 65 000 UBT (cheptel de la zone directement concernée et bétail transhumant). On craignait avec raison que le dépassement de ce chiffre pourrait entraîner la sous-alimentation du bétail pendant la saison sèche, ainsi que le surpâturage et la dégradation des ressources pastorales.

La totalité des pailles de mil et de sorgho sont consommables par les animaux mais ceux-ci préfèrent les feuilles et les gaines de feuilles. Une culture de mil laisse habituellement de 2 à 4 tonnes de paille sèche par hectare ce qui représente une consommation réelle de fourrage sec aux champs par les bovins de 0,8 à 1,2 tonne. Les fanes de niébé et autres légumineuses sont très appréciées. L'érosion des périmètres cultivés suit étroitement l'accroissement de la population.

La production secondaire de fourrage par ces périmètres cultivés compense en grande partie la diminution corrélative de la surface du territoire proprement pastoral. L'augmentation de la charge des pâturages résulte donc surtout de l'augmentation du cheptel plus que de l'extension de l'agriculture. Dans ce sens il n'y a pas lieu d'imputer la difficile situation de l'élevage à l'extension de l'agriculture. Au contraire, les résidus de

récolte devraient permettre de régulariser et améliorer l'alimentation des animaux à la période de l'année la plus difficile

Les cultures fourragères

L'alimentation constitue le poste le plus cher dans l'exploitation des troupeaux. Au Sahel les pâturages naturels sont les principales sources d'alimentation. C'est pourquoi les efforts doivent porter sur l'amélioration des conditions d'exploitation de ces pâturages. Il faudrait pour cela, sauvegarder les pâturages existants avant de songer aux cultures irriguées.

Les cultures fourragères intensives

Au Sénégal, de nombreuses espèces végétales ont été testées en station et plusieurs d'entre elles sont vulgarisées. Le panicum maximum (ou herbe de Guinée) est l'espèce qui a donné le plus de satisfaction. Il est originaire des savanes humides d'Afrique tropicale. L'intensification fourragère au Sénégal est envisagée, en association avec le maraîchage, où la graminée tropicale panicum maximum permet une éradication des nématodes, un accroissement de la matière organique dans le sol et la constitution de réserves fourragères pour les éleveurs urbains de moutons.

Les quantités d'eau à apporter varient en fonction des conditions climatiques. Dans la zone du projet où l'évapotranspiration est forte les quantités varieront de 12 à 18 000 m³/ha/an selon la pluviométrie.

Il s'agit bien de quantités optimales. On peut également conduire les plantes fourragères en restreignant l'apport d'eau (afin de l'économiser) en « semi-intensif ». Cela, bien sûr, réduit le rendement. Des études doivent être réalisées sur ce sujet car la valorisation de l'eau par les plantes fourragères reste largement du domaine de la recherche dans la zone du projet.

Les limites de la production fourragère irriguée

La culture fourragère irriguée ne se justifie que si la transformation en lait ou viande est payante. La situation de l'irrigation par rapport aux marchés potentiels (grande ville) revêt ici une importance particulière.

Le problème de l'élevage dans la vallée et l'association agriculture-élevage

Les objectifs fondamentaux poursuivis par les États en matière d'élevage dans la région du fleuve Sénégal sont :

- Reconstituer et développer l'élevage traditionnel actuel en assurant l'alimentation du cheptel extensif en fin de saison sèche ;
- Développer un élevage de type intensif en vue de l'embouche et de la production de lait, complémentaire de l'élevage extensif.

Ces deux objectifs supposent l'existence d'une production fourragère irriguée suffisante, et l'intégration de l'élevage à l'agriculture devient donc une nécessité si l'on veut valoriser ces superficies fourragères. En effet, la mise en place d'un programme d'embouche villageoise moderne se traduit par la sédentarisation d'une partie du

troupeau, mieux utilisé et associé à l'agriculture (apport d'engrais naturel, culture attelée, production de lait).

Cette sédentarisation aurait pour second résultat de réduire la concurrence entre agriculteurs et éleveurs, pâturages et champs de culture, concurrence aggravée ces dernières années par la sécheresse : les troupeaux descendent vers le sud mieux arrosé mais plus cultivé alors que les agriculteurs, pour se prémunir contre de mauvaises récoltes, cherchent à augmenter les superficies mises en culture.

La sécurisation du troupeau à l'abri des effets de la sécheresse suppose l'organisation d'une décharge du cheptel du nord en direction du sud. La situation contrastée de la première région semble a priori favorable à l'exécution d'un tel programme : zone nord dense en habitants et en bovins, zone sud moins peuplée au cheptel moins important.

Le schéma théorique devrait donc prévoir de réserver les plateaux aux pâturages et les vallées à une agriculture intensifiée. Mais la réalisation de ce schéma se heurte au double obstacle de l'onchocercose dans les vallées et de nombreux foyers de trypanosomiase sur les plateaux; les races bovines du nord (zébus) n'étant pas trypanotolérantes,

Il faudrait donc soit modifier la nature même du troupeau (race Ndama) soit lutter efficacement contre la trypanosomiase. Des recherches importantes sont en cours dans ces deux directions.

3.3.7.1 Évaluation des besoins en eau pour l'élevage

Les hypothèses de calcul utilisées pour le calcul des besoins en eau du cheptel proviennent de la référence [Réf. 20].

Besoins en eau	Bovins, équins, asins	35l/j	par tête
	Ovins, caprins	4,6%	par tête

Le calcul des besoins en eau pour le cheptel s'abreuvant à la Falémé est détaillé en Annexe B. Les taux de croissance ont été déduits de l'accroissement du cheptel entre 2000 et 2010. Les données relatives au cheptel de la région de Kayes ont été obtenues auprès de la Direction Régionale du Ministère de l'Élevage et de la Pêche de Kayes. Le Tableau 3-13 qui suit résume les résultats.

Tableau 3-13 Évaluation des besoins en eau du cheptel s'abreuvant à la Falémé

République du Sénégal				République du Mali			
Cheptel du Dpt. de Bakel ayant impact sur la Falémé en 2015		Total en m ³	l/s	Cheptel de la Région de Kayes ayant impact sur la Falémé en 2015		Total en m ³	l/s
Février	28	181 135	203	Février	28	161 961	181
Mars	31	200 543	225	Mars	31	179 314	201
Avril	30	194 074	217	Avril	30	173 529	194
Mai	31	200 543	225	Mai	31	179 314	201
Juin	15	97 037	109	Juin	15	86 765	97
Cheptel du Dpt. de Bakel ayant impact sur la Falémé en 2025		Total en m ³	l/s	Cheptel de la Région de Kayes ayant impact sur la Falémé en 2025		Total en m ³	l/s
Février	28	237 718	266	Février	28	220 852	247
Mars	31	263 188	295	Mars	31	244 515	274
Avril	30	254 698	285	Avril	30	236 627	265
Mai	31	263 188	295	Mai	31	244 515	274
Juin	15	127 349	143	Juin	15	118 314	133

3.3.8 Résumé des calculs des besoins en eau de l'agriculture

Nous venons de discuter le calcul des besoins en eau pour le cheptel devant s'abreuver à la Falémé.

On rappellera brièvement ci-dessous notre démarche pour le calcul des besoins en eau pour les cultures irriguées. Nous avons en premier lieu déterminé les potentiels de cultures irriguées en hivernage. Pour ce faire nous avons d'abord examiné les productions agricoles historiques. Nous avons constaté que les cultures irriguées dans la région de Kayes sont généralement inférieures à 8% de la superficie des cultures pluviales. Nous avons également observé que les cultures irriguées récoltées sont de l'ordre de 55% à 70% des superficies irriguées aménagées. Cette faible intensité culturale est comparable à celle observée le long du Fleuve Sénégal.

Nous avons également établi à partir de cet examen les assolements types des cultures (Tableau 3-14 et Tableau 3-15). Il est important à ce niveau de comprendre que ces assolements sont certes théoriques mais ils permettent de déterminer les besoins en eau et reflètent les pratiques en cours.

Nous avons préparé les fichiers climatiques et de précipitation sur la base des données recueillies. Pour Kéniéba, les données de précipitation historiques étaient limitées et nous avons dû générer la précipitation quinquennale sèche par corrélation avec les stations avoisinantes.

Les fichiers de culture ont été établis à partir des deux références suivantes : [Réf. 6] et [Réf. 21].

Les fichiers sols ont été construits à partir des informations pédologiques des sols Falo alluvial et Foonde.

Les superficies potentielles de culture irriguée du côté Mali ont été obtenues de la Direction Régionale du Génie Rural à Kayes et de la Direction Nationale du Génie Rural à Bamako. Les superficies potentielles de culture irriguée du côté du Sénégal ont été déduites avec le personnel de la Délégation Départementale de Bakel. Nous avons retenu l'évaluation sur une base d'une bande 1km (500 m de part et d'autre de la Falémé) (cf. Planche Go13 en Annexe A).

Dans les deux cas de superficies potentielles de cultures irriguées et non aménagées en territoires sénégalais et maliens, ces superficies ont été validées par examen des productions historiques du département de Bakel et à la lumière de la référence [Réf. 19].

Pour le calcul des besoins bruts en eau, l'efficacité a été estimée pour des canaux primaires, secondaires et tertiaires en terre. Nous avons obtenu une efficacité de 70%. Ces calculs sont en présentés en Annexe B. Une efficacité de 80% au niveau de l'application et prélèvements a été supposée pour une efficacité globale de 56%.

Pour les calculs des besoins en eau, les pertes par évaporation dans la Falémé ont été estimées de façon préliminaire. Les détails sont également en Annexe B.

Le Tableau 3-16 résume les besoins en eau pour l'irrigation, le cheptel devant s'abreuver à la Falémé et une appréciation des pertes par évaporation. Les calculs détaillés sont présentés en Annexe B.

Il est à noter qu'aucune donnée n'est disponible relativement aux cultures de décrue le long de la Falémé. Les enquêtes en cours (financement de USAID) se concentrent une fois de plus sur les cultures de décrue le long du fleuve Sénégal.

Tableau 3-14 Assolements et superficies des cultures irriguées en hivernage – Hypothèse pour calculs des besoins en eau des cultures irriguées

CULTURES IRRIGUÉES HIVERNAGE MALI							Fichier Climat et Précip.		
	Potentiel	Riz	Polycole	Riz	Sorgho	Maïs	Evapotrans.	Pluie	
TOTAL	270			108	108	54	Bakel	Bakel Quinq. Sèche	A
TOTAL	1880			752	752	376	KENIEBA	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	B
		FICHIERS CULTURE		RIZ direct Hiv 118j Jul.	SORGHO Hiv 125j 1Jul	MAIS Hiv 95j 21Jun			
		FICHIERS SOLS		Fondé.SOI	Fondé.SOI	Fondé.SOI			
	Potentiel			Riz	Sorgho	Maïs			
Grand Total	2150			860	860	430			
CULTURES IRRIGUÉES HIVERNAGE SÉNÉGAL							Fichier Climat et Précip.		
	Potentiel	Riz	Polycole	Riz	Sorgho	Maïs	Evapotrans.	Pluie	
TOTAL	375	80	295	80	197	98	Bakel	Bakel Quinq. Sèche	C
TOTAL	1195	195	1000	195	667	333	Kidira	Kidira Quin Sèche	D
TOTAL	685	275	410	275	273	137	Kenieba	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	E
TOTAL	130	25	105	25	70	35	Kidira	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	F
		FICHIERS CULTURE		RIZ direct Hiv 118j Jul.	SORGHO Hiv 125j 1Jul	MAIS Hiv 95j 21Jun			
		FICHIERS SOLS		Fondé.SOI	Fondé.SOI	Fondé.SOI			
	Potentiel	RIZ	Polycole	Riz	Sorgho	Maïs			
Grand Total	2385	575	1810	575	1207	603			

Tableau 3-15 Assolements et superficies des cultures irriguées en contre-saison froide – Hypothèse pour calculs des besoins en eau des cultures irriguées

CULTURES IRRIGUÉES CONTRE-SAISON FROIDE MALI					Fichier Climat et Précip.			
	Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraîchage	TOTAL	Evapotrans.	Pluie	
TOTAL	54	5	38	11	54	Bakel	Bakel Quinq. Sèche	G
TOTAL	376	38	263	75	376	KENIEBA	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	H
FICHIERS CULTURE		SORGHO CSF 120j 7Nov	MAIS CSF 120j 7nov	Légumes CSF 100j 7Dec				
FICHIERS SOLS		Falo.SOI	Falo.SOI	Falo.SOI				
	Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraîchage	TOTAL			
Grand Total	430	43	301	86	430			
CULTURES IRRIGUÉES CONTRE-SAISON FROIDE SÉNÉGAL					Fichier Climat et Précip.			
	Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraîchage	TOTAL	Evapotrans.	Pluie	
TOTAL	75	8	53	15	75	Bakel	Bakel Quinq. Sèche	I
TOTAL	239	24	167	48	239	Kidira	Kidira Quin Sèche	J
TOTAL	137	14	96	27	137	Kenieba	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	K
TOTAL	26	3	18	5	26	Kidira	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	L
FICHIERS CULTURE		SORGHO CSF 120j 7Nov	MAIS CSF 120j 7nov	Légumes CSF 100j 7Dec				
FICHIERS SOLS		Falo.SOI	Falo.SOI	Falo.SOI				
	Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraîchage	TOTAL			
Grand TOTAL	477	48	334	95	477			

Tableau 3-16 Tableau récapitulatif des besoins en eau pour l'irrigation et le cheptel et évaluation des pertes par évaporation

Besoins en Eau pour l'irrigation		Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
		Contre-saison froide		Contre-saison chaude			Hivernage					Contre-saison froide	
Besoins bruts pour l'irrigation	en m ³ /s	1,16	1,37	0,28	0,00	0,00	2,61	0,35	0,33	1,03	2,04	0,51	0,65
Pertes par évaporation		Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Voir Calculs en Annexe	en m ³ /s	1,53	1,55	0,98	0,77	0,61	1,50	1,17	-0,25	0,47	1,34	1,95	1,46
Besoins en eau pour le cheptel en mois critiques			Fév	Mars	Avril	Mai	Juin						
Voir Calculs en Annexe	en m ³ /s		0,51	0,57	0,55	0,57	0,28						

Efficience	Primaire /Secondaire/Tertiaire	70%	A	Voir Calculs en Annexe B
	Efficience à l'application et au prélèvement	80%	B	
	Global	56%	A*B	

3.3.9 Les besoins en eau des industries minières

Dans le cadre des enquêtes sur les besoins en eau, SLII a consulté les principales compagnies minières opérant dans la zone d'étude. Les mines et projets concrets de mines sont identifiés sur la Figure 3-6 ci-après. Il s'agit uniquement de mines d'or, l'exploitation de minerai de fer au Sénégal oriental n'en étant pour l'instant qu'au stade de projet à l'horizon plus ou moins précis.²⁵

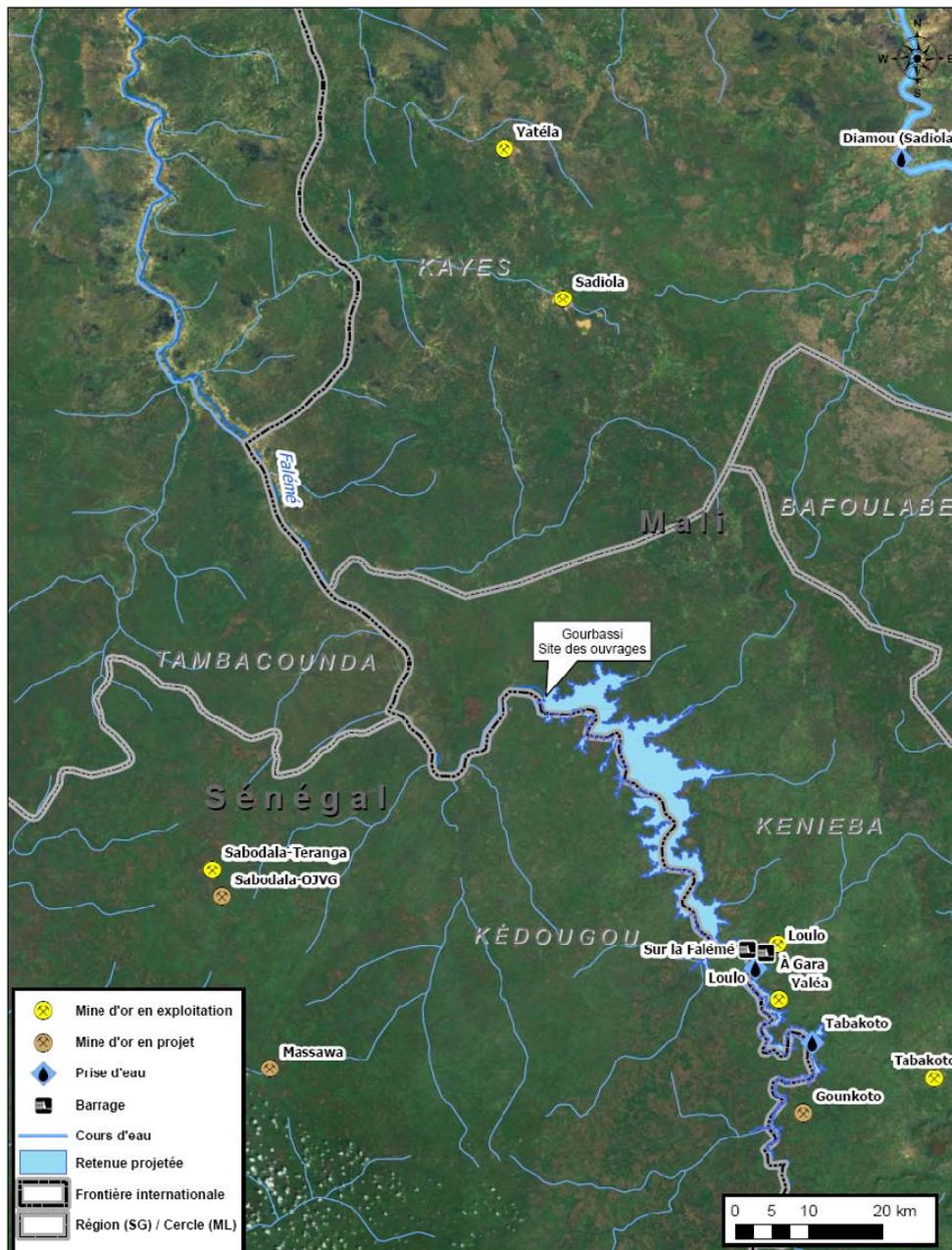


Figure 3-6 Carte de localisation des mines d'or

²⁵ Ni la MIFERSO (Société des Mines de Fer du Sénégal Oriental) ni ArcelorMittal (potentiel investisseur ayant signé une convention avec la MIFERSO pour l'exploitation du gisement de la Falémé) n'ont répondu aux demandes d'entrevue de SLII à ce sujet.

D'après les informations recueillies :

- La mine de YATELA est auto-suffisante en eau douce par prélèvement des sources d'eau souterraine.
- La mine de SADIOLA est alimentée en eau douce directement du fleuve Sénégal via un pipeline de 53 km qui la relie à Diamou ; selon une convention avec l'OMVS, elle peut prélever jusqu'à 8 000 000 m³/an mais en pratique n'a jamais atteint ce quota (besoins entre 6 et 7 millions de m³/an).
- La mine de LOULO pompe l'eau de la Falémé en amont de Goubassi où un seuil déversant situé quelques centaines de mètres en aval de la confluence Falémé-Gara crée une petite retenue ; l'eau pompée à la Falémé est ensuite refoulée dans un réservoir créé en barrant le lit de la rivière Gara entre le village de Djidjian Kéniéba et la mine; la demande est de 2 000 000 m³/an en moyenne.
- La mine de YALÉA est une dépendance de la mine et de l'usine de LOULO et n'a donc pas de besoin spécifique additionnel en eau.
- La mine de TABAKOTO pompe l'eau de la Falémé quelques 15 km en amont de LOULO (voir Photo 8 en Annexe D) depuis février 2009, à raison de 90 m³/h ; à partir de 2012 le prélèvement en eau de la Falémé atteindra 200 m³/h.
- La station de pompage pour le projet de GOUNKOTO sera située 25 km plus en amont sur la Falémé ; ses besoins sont évalués à 450 000 m³/an à partir de 2012-2013.
- Au Sénégal, la mine de TERANGA SABODALA est auto-suffisante en eau douce (bassins de rétention de l'eau de pluie et forages).
- Le projet de mine OJVG SABODALA prévoit la construction d'un réservoir de rétention des eaux de pluie d'une capacité de 9,4 hm³.
- La station de pompage pour la mine de MASSAWA devrait être située en aval du site de Goubassi ; cette mine devrait consommer 2 100 000 m³/an à partir de 2013-2014.

Il y a de nombreuses autres prospections minières en cours dans la région et de nouveaux projets verront forcément le jour ce qui ne manquera pas d'augmenter les besoins en eau et la pression sur les ressources en eau de la zone.

3.3.10 La navigation commerciale

Depuis le début des années 1970 (1972-1973), il n'y a plus à proprement parler de navigation commerciale sur le fleuve Sénégal si ce n'est de quelques croisiéristes qui offrent des circuits sur le fleuve à partir de Saint-Louis. Traditionnellement, un trafic significatif reliait Saint-Louis à Kayes mais le développement du réseau routier a peu à peu érodé le transport fluvial. Pourtant, l'amélioration des conditions de navigation commerciale est l'un des piliers qui supportent l'aménagement du fleuve Sénégal.

Actuellement, il n'y a pas de navigation commerciale fluviale significative sur le fleuve Sénégal principalement à cause d'un tirant d'eau trop faible. Bien entendu la situation varie selon la localisation sur le fleuve. Ainsi :

- De Saint-Louis à Podor, 252 km plus en amont, le tirant d'eau minimum varie entre 2 et 2,5 m et ce toute l'année durant ;
- De Podor à Bakel (510 km), le tirant d'eau minimum est d'environ 1 m durant 6 mois de l'année ;
- De Bakel à Kayes, 130 km plus en amont le tirant d'eau est suffisant seulement 3 mois par année.

La construction du barrage de Manantali a été une étape essentielle de la régularisation du fleuve Sénégal qui devrait permettre à terme, avec le dragage des seuils et le passage d'une culture de décrue à une culture irriguée, au développement d'une navigation régulière sur le fleuve.

Les dernières études de navigation consultées par SLII indiquent que compte tenu des résultats des dernières études sur la gestion du barrage de Manantali et de la décision de l'OMVS d'adopter l'hydrogramme de crue artificielle « IRD 2 », la faisabilité d'une navigation régulière sur le fleuve Sénégal est envisageable pour un débit d'étiage (débit minimal garanti) de 300 m³/s à Bakel [Réf. 22].

CHAPITRE 4

Études hydrotechniques

4. ÉTUDES HYDROTECHNIQUES

4.1 ÉTUDE DES PLUIES

L'étude des pluies a débuté par une analyse de la cohérence des données de la base HYDRACESS réalisée en utilisant des courbes double-masse sur l'ensemble des stations du bassin. L'analyse par double-masse permet d'identifier s'il y a une dérive dans le temps d'une station de mesure par rapport aux autres. Dans l'éventualité où des changements interviennent à l'une des stations de mesure, un changement de pente dans la courbe double-masse est observé. Certaines anomalies ont été rencontrées lors de l'analyse double-masse annuelle des stations de la base HYDRACESS. La station pluviométrique de Bakel présente des irrégularités lorsque comparée à Kayes, Kidira et Labé. Toutefois, aucune correction n'a été requise étant donné que les anomalies identifiées n'avaient pas d'impact sur les calculs réalisés dans cette étude.

En vue de déterminer la pluie centrée sur le bassin, une analyse de la distribution spatiale par polygones de Thiessen a ensuite été réalisée. Cette méthode permet d'établir la pondération des différentes stations. La Figure 4-1 permet d'établir que les stations de Goubassi, Guene-Gore et Labé ont une pondération non nulle pour établir la pluie centrée sur le bassin versant. Le Tableau 4-1 présente les pondérations obtenues.

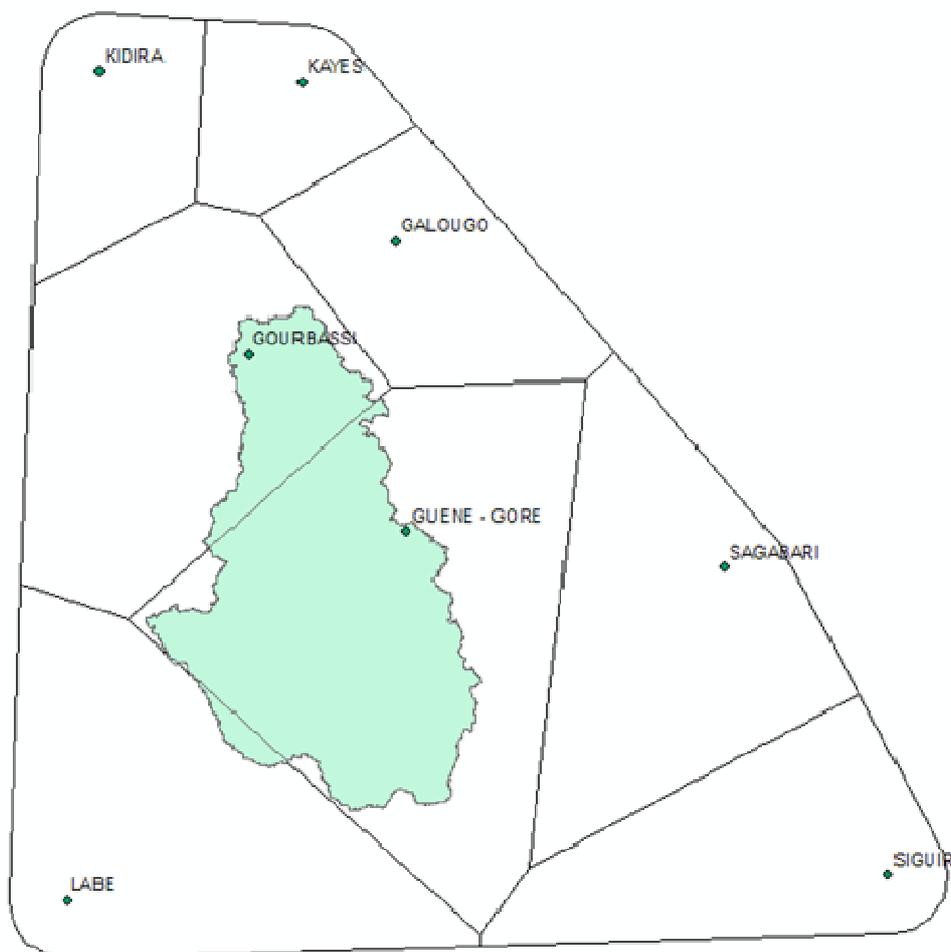
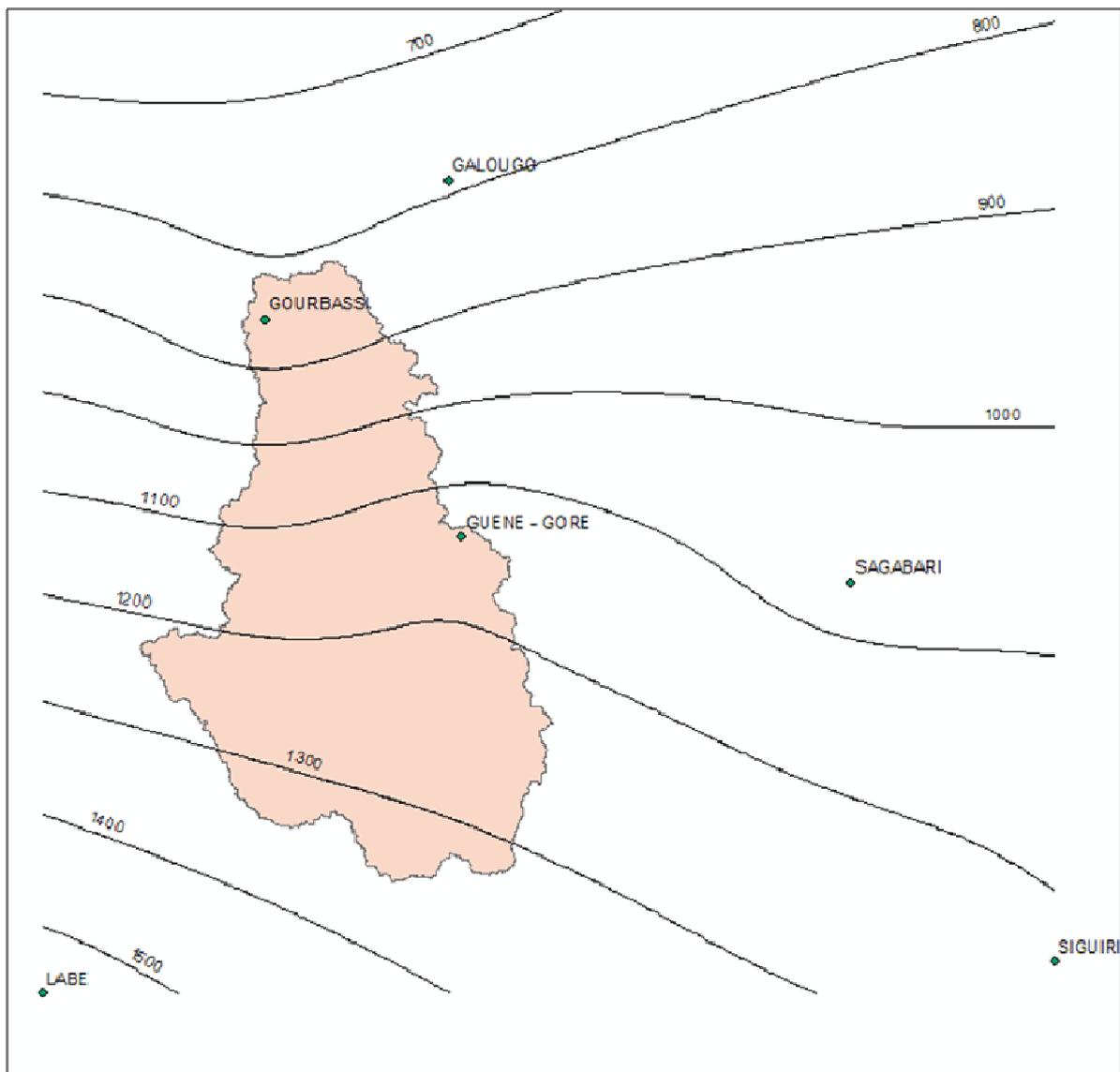


Figure 4-1 Polygones de Thiessen

Tableau 4-1 Pondérations des stations pour le calcul de la pluie centrée sur le bassin de Gourbassi

Station	Pondération
Gourbassi	0,20
Guene Gore	0,78
Labé	0,02

Suite à l'analyse de la pondération des différentes stations comprises dans le bassin versant de la Falémé à Gourbassi, la distribution spatiale de la pluie centrée sur le bassin a été établie. La période utilisée est de 1958 à 2004 soit de 46 ans. Le logiciel HEC4 a été utilisé pour établir les corrélations aux stations voisines et compléter les données manquantes.

**Figure 4-2 Isohyètes interannuels reconstitués (1958-2008)**

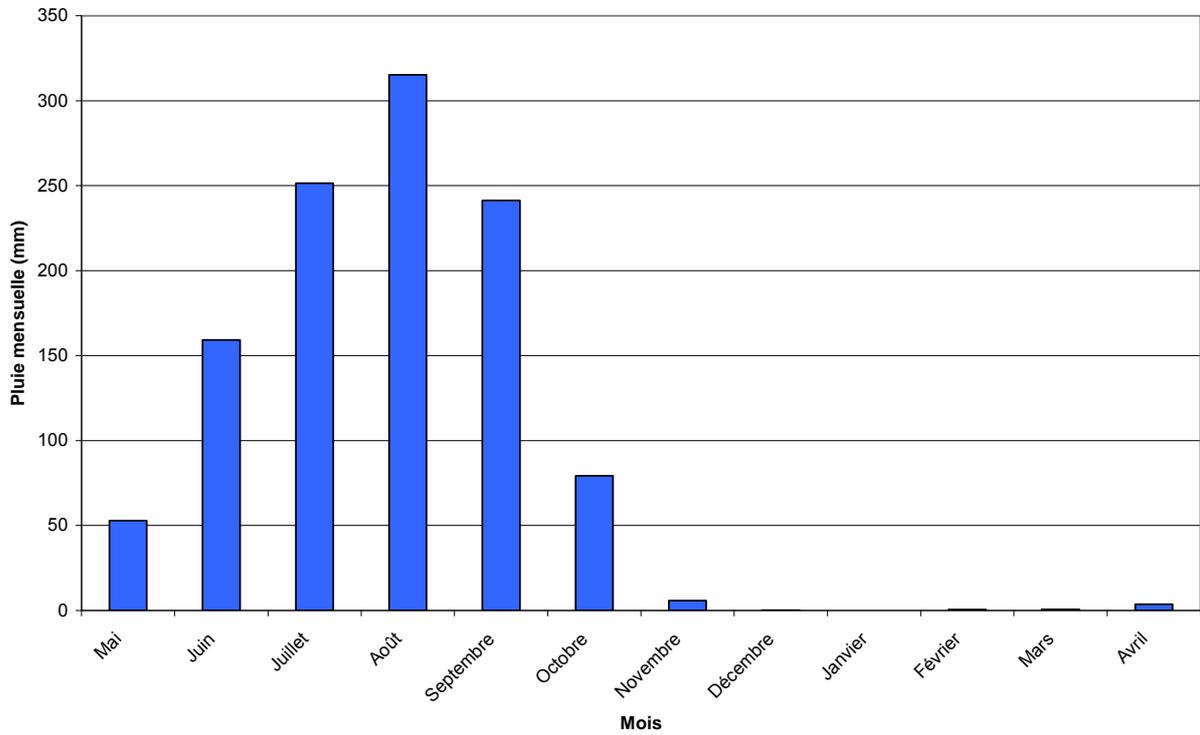


Figure 4-3 Distribution de la pluie mensuelle moyenne sur le bassin de Goubassi (1958-2008)

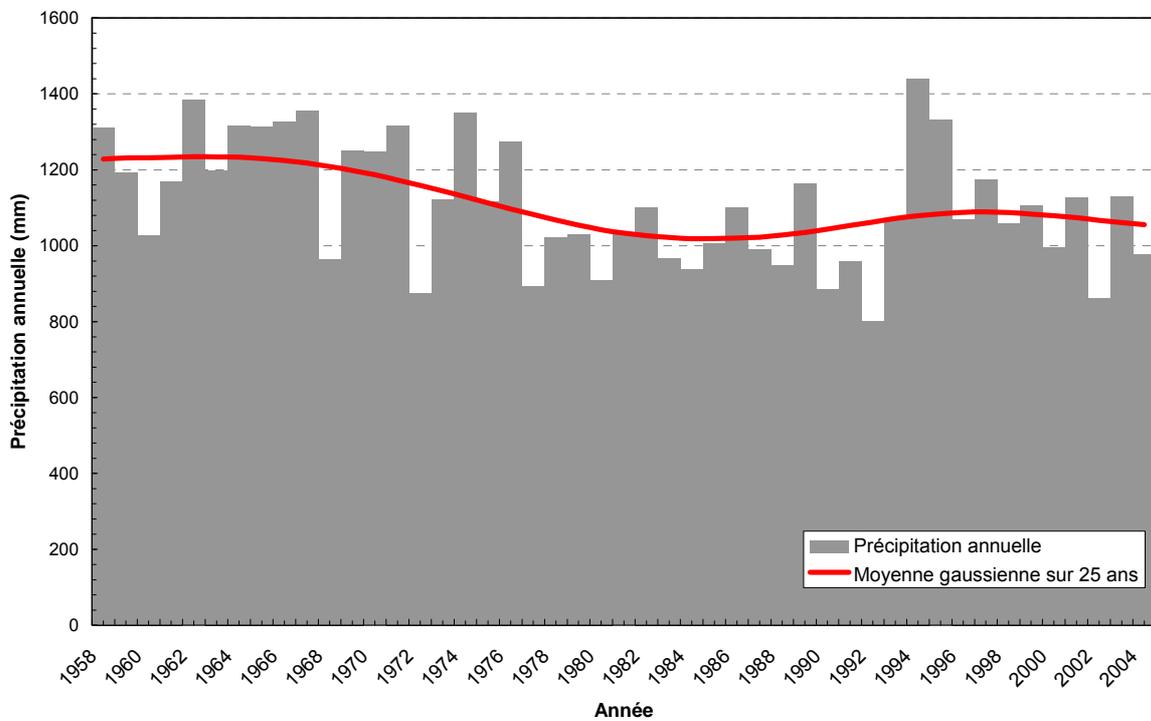


Figure 4-4 Tendence à long terme des précipitations – Pluie centrée sur le bassin de Goubassi

Afin d'apprécier la distribution moyenne des pluies sur le bassin, La Figure 4-2 illustre les isohyètes interannuels reconstitués pour la période de 1958 à 2008 en utilisant l'ensemble des stations pluviométriques appropriées (Gourbassi, Guene-Gore, Labé, Galougo, Sagabari, Siguiri). Cette figure permet de constater la diminution de la pluviosité dans la zone sahélienne avec 800 mm à Galougo comparativement à celle de la zone guinéenne (1500 mm à Labé).

La Figure 4-3 présente les hydrogrammes des précipitations moyennes mensuelles sur le bassin de Gourbassi.

Afin de compléter l'analyse de la tendance des pluies, la moyenne à long terme de type Gaussienne de la pluie centrée sur le bassin est présentée à la Figure 4-4. Cette figure montre une tendance à la baisse pour la période suivant 1970.

4.1.1 Relation intensité-durée-fréquence

L'étude des pluies caractéristiques à prendre en compte pour l'aménagement du territoire et pour les équipements d'assainissement a conduit à l'établissement des relations d'intensité-durée-fréquence des pluies. Ces relations sont présentées à la Figure 4-5. Elles pourront être utilisées aux étapes ultérieures de l'étude afin d'établir les crues à prendre en compte sur les sous-bassins versants notamment en utilisant la méthode rationnelle pour l'aménagement du territoire.

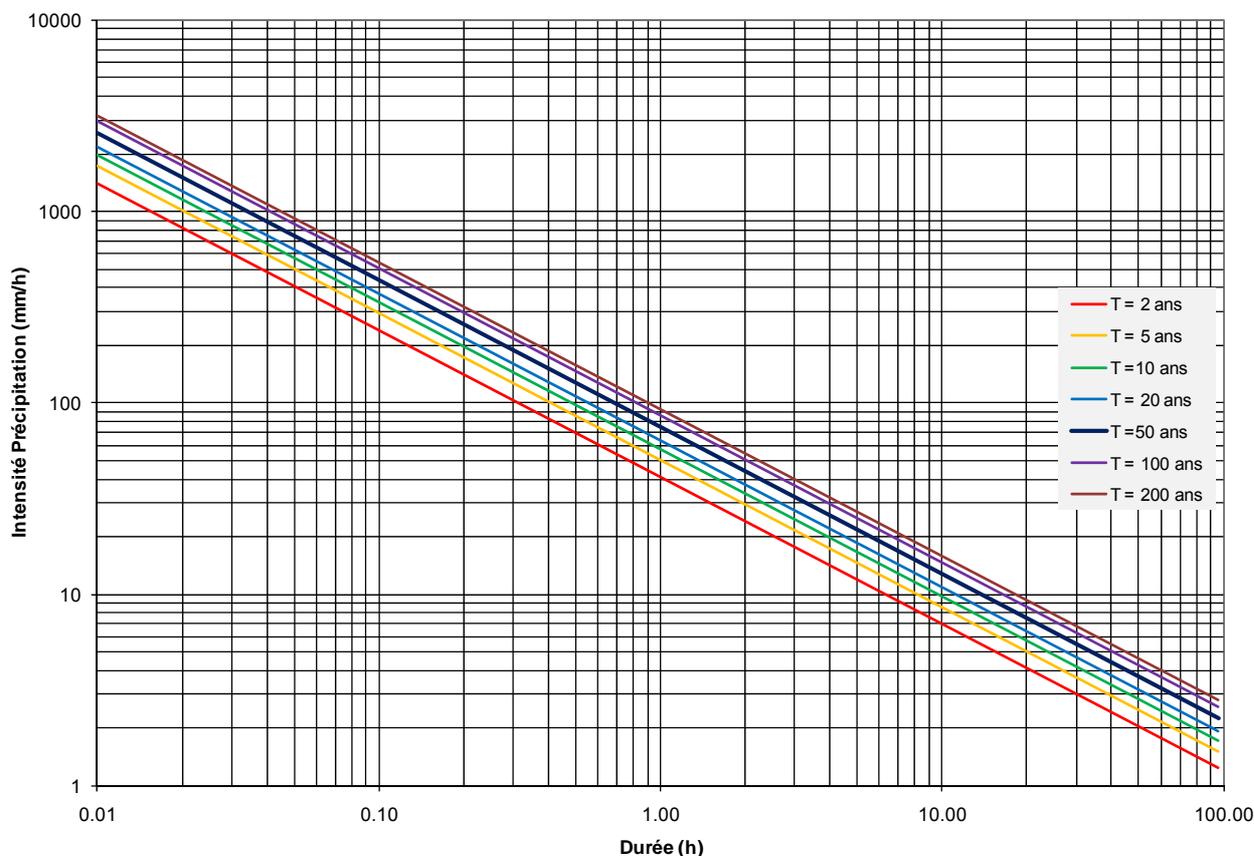


Figure 4-5 Courbe intensité-durée-fréquence au site de Gourbassi

La base du développement des relations présentées à la Figure 4-5 sont les données de pluies journalières. Les différentes étapes de calcul des courbes intensité-durée-fréquence sont données ci-dessous :

- 1) Analyse de fréquence des pluies de 24 h ;
- 2) Calcul de l'intensité de la pluie pour les durées supérieures à 24 h ;
- 3) Calcul d'une relation durée-fréquence à partir des pluies de durées de 24 h et plus ;
- 4) Détermination d'une équation représentant le mieux la relation durée-intensité pour toutes les récurrences données ;
- 5) Choix d'une seule équation globale pour la relation durée-intensité représentant le mieux toutes les récurrences (valeur moyenne des paramètres) ;
- 6) Comparaison de la relation établie aux points durée-intensité connus (durée de 24 h et plus) et minimisation de l'erreur systématique.

4.2 ÉTUDE DES CRUES

4.2.1 Analyse de fréquence des crues

L'analyse des crues est réalisée pour le site de Gourbassi en utilisant les données à la station éponyme.

L'analyse des fréquences réalisées pour les débits de pointe et sur les volumes de crues a permis de déterminer que la valeur de la crue de conception de Gourbassi établie en 1970 par SENEGAL-CONSULT n'est plus appropriée étant donné la baisse du régime hydrologique qui va perdurer.

L'analyse de fréquence a été réalisée sur la période 1954-2004 en utilisant les distributions de Gumbel, Log Pearson 3 et Log Normal. Cette période est légèrement plus longue que la série de base utilisée pour les simulations énergétiques présentées au Chapitre 5 qui est de 1961-2009. Cette période là a été retenue pour les crues afin de saisir la série la plus longue possible et d'inclure un maximum de pointes dans l'analyse. La série retenue permet d'obtenir une estimation réaliste des pointes de récurrence donnée en incluant les pointes observées entre 1954 et 1961.

Les pointes de crues sont le mieux représentées par la loi de Log-Pearson 3, tel que démontré par un test des moindres carrés. Les différentes lois statistiques sont présentées à la Figure 4-6. La crue de conception retenue par SENEGAL CONSULT en 1970 [Réf. 26] avait une période de retour de 1000 ans et une pointe de 3400 m³/s. L'analyse de fréquence présentée à la Figure 4-6 permet d'établir que la crue de 1000 ans serait plutôt de 2407 m³/s ce qui présente une réduction substantielle. Le Tableau 4-2 donne la valeur des crues pour des récurrences données.

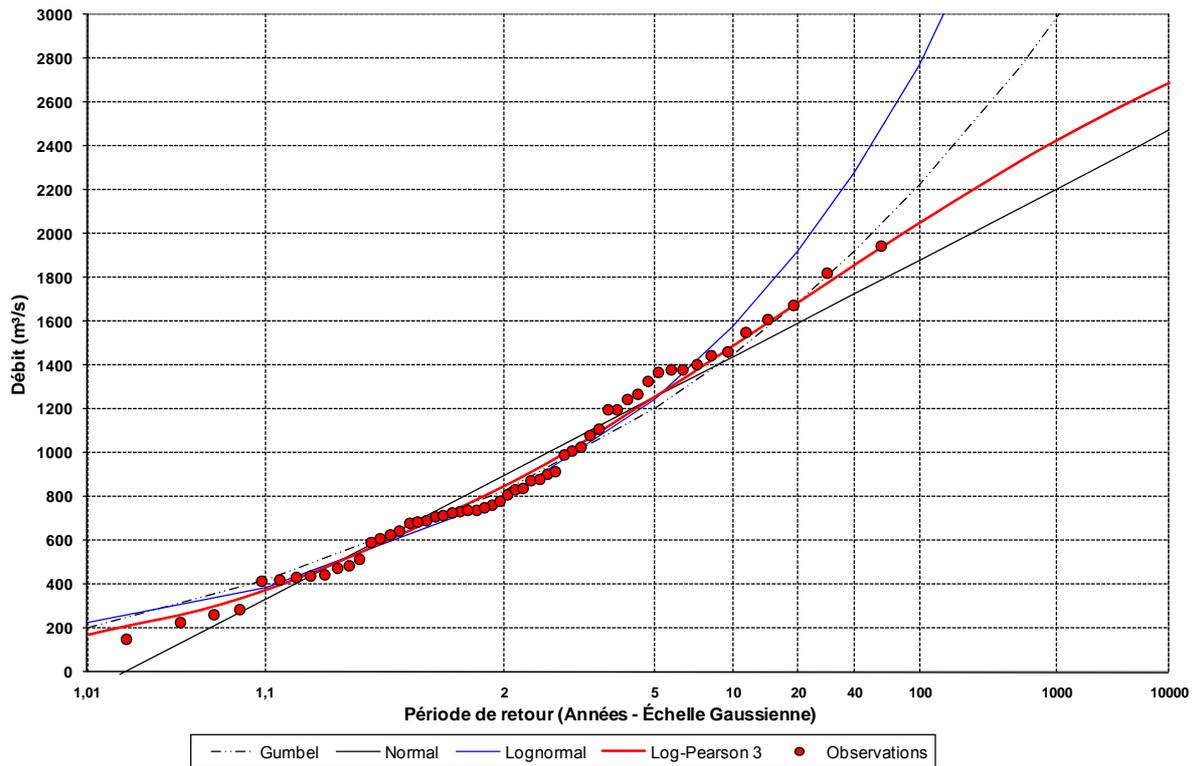


Figure 4-6 Analyse de la fréquence des pointes de crues

L'analyse de la fréquence des volumes de crues a été réalisée pour la période de 1954 à 2009. La durée de la crue est de 30 jours au total. Le bassin versant au site de Gourbassi a un temps de réponse de 9 jours. Les résultats de l'analyse sont présentés à la Figure 4-7. En 1970, SENEGAL-CONSULT avait établi le volume de la crue de conception à $4194 \times 10^6 \text{ m}^3$. La valeur révisée par SLII en utilisant une distribution de Log Pearson 3 et la méthode des moments est de $3970 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Tableau 4-2 Falémé à Gourbassi – Fréquence des crues

Période de retour T (ans)	Probabilité	Q (m³/s) LogPearson 3
1,01	0,99	170
1,1	0,91	370
2	0,5	850
5	0,2	1250
10	0,1	1490
20	0,05	1690
40	0,025	1860
100	0,01	2050
500	0,002	2330
1000	0,001	2430
5000	0,0002	2620
10 000	0,0001	2690

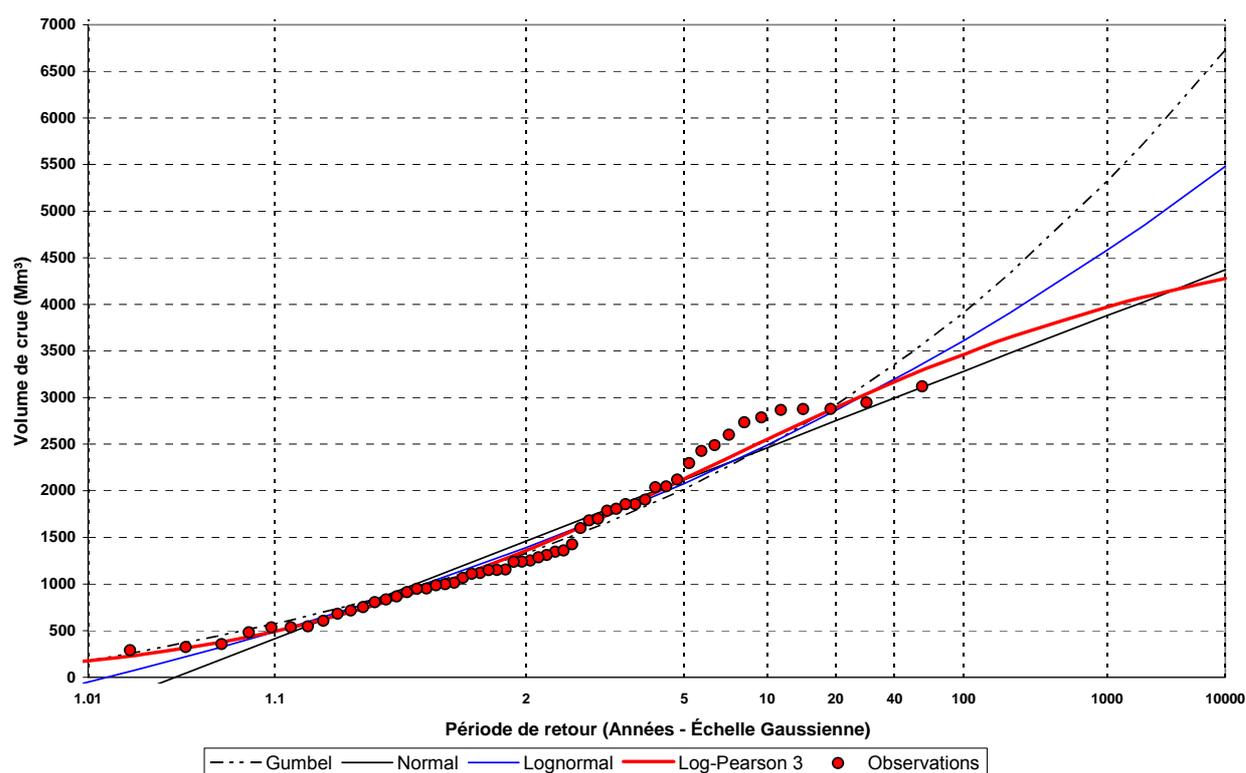


Figure 4-7 Analyse de la fréquence des volumes de crues

4.2.2 Laminage des crues

Étant donnée la variation importante de la pointe de débit de la crue de 1000 ans depuis l'analyse réalisée en 1970, une mise à jour du laminage de la crue a été jugée appropriée. Les résultats du laminage indiquent qu'une réduction de la taille de l'évacuateur de crues est envisageable. La Figure 4-8 présente le laminage de la crue de 1000 ans établie avec les données de 1954-2009. Pour un choix de la crue de 1000 ans comme crue de conception, tel que l'avait effectué SENEGAL-CONSULT, la largeur de l'évacuateur de crue pourrait être réduite de 8 m pour une largeur totale de 32 m ce qui présente une économie substantielle sur cet ouvrage²⁶.

²⁶ La fréquence adoptée pour la crue de conception de l'aménagement sera sélectionnée ultérieurement lors de l'étude des variantes et d'APS.

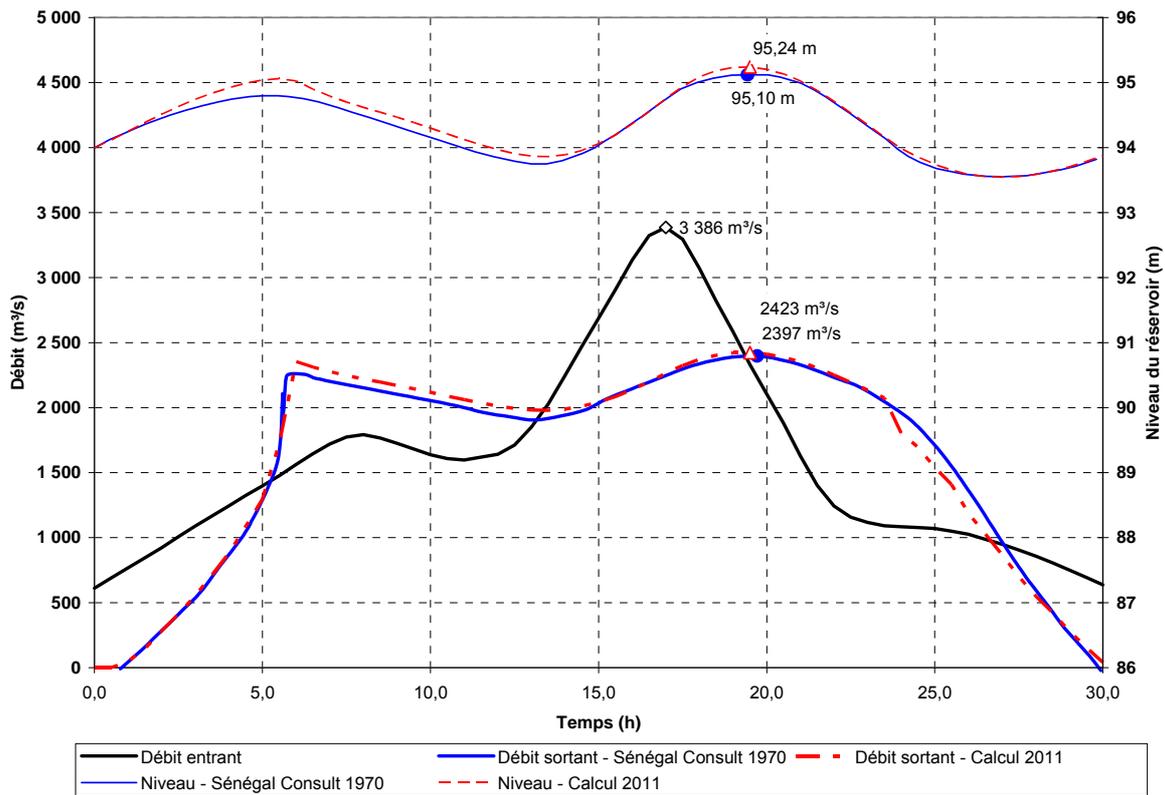


Figure 4-8 Validation du modèle de laminage sur l'ancienne crue de conception (SENCO 1970)

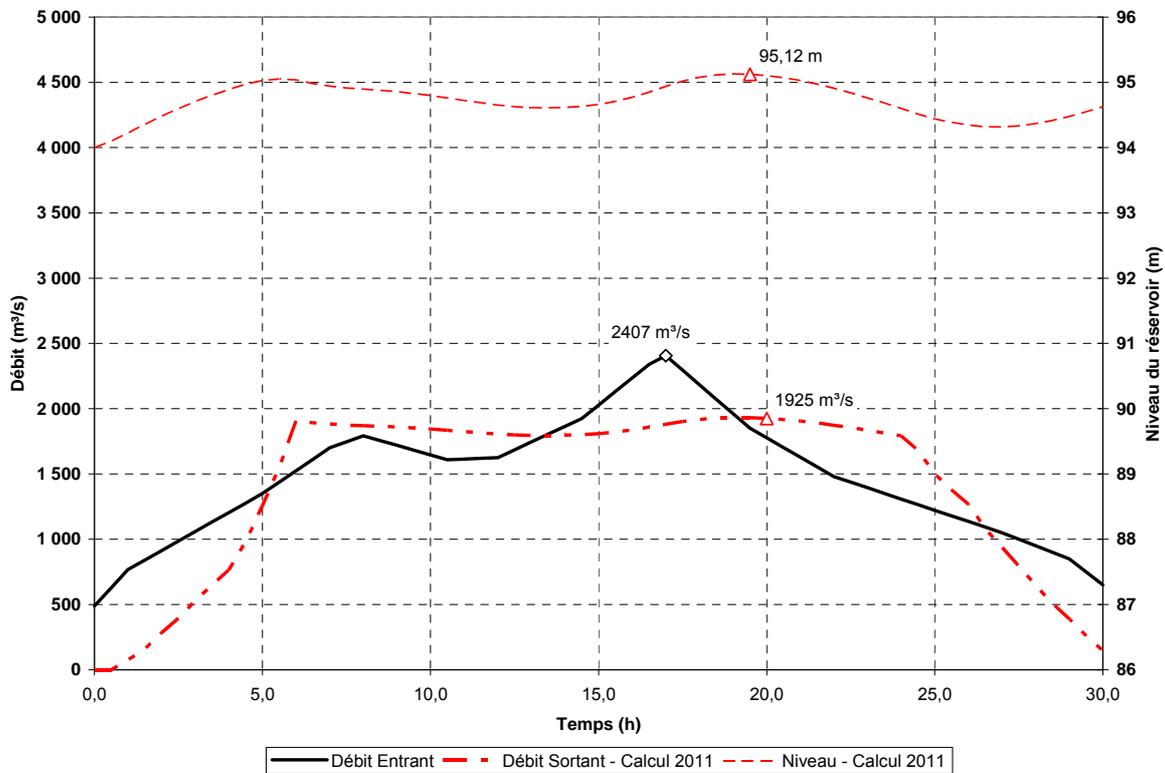


Figure 4-9 Laminage de la crue de 1000 ans (SLII 2011)

4.2.3 Coefficient de ruissellement

Le calcul du coefficient de ruissellement au site de Gourbassi a été effectué en utilisant la pluie annuelle centrée sur le bassin et le ruissellement à Gourbassi. La moyenne à long terme est de 0,16. Le coefficient de ruissellement est faible mais représentatif d'un bassin ayant de faibles précipitations et de fortes pertes par évapotranspiration. La moyenne du coefficient de ruissellement est utilisée dans le calcul de l'évaporation nette de la retenue projetée.

4.2.4 Pluie maximale probable

Une étude de la pluie maximale probable (PMP) a été réalisée en utilisant la méthode proposée par l'Organisation Météorologique Mondiale [Réf. 14]. La PMP a été constituée en utilisant une pluie antécédente qui cause des conditions de saturation du sol. Cette pluie antécédente est d'une durée égale au temps de concentration du bassin soit 9 jours au site de Gourbassi et d'une période de récurrence de 100 ans. Ensuite, la PMP s'applique sur le bassin. La PMP est calculée pour différentes durées soit 24, 48 et 72 heures. Le calcul de la pluie centrée sur le bassin a été réalisé en utilisant la méthode des Polygones de Thyessen pour établir le coefficient de pondération des trois stations suivante : Gourbassi, Guene-Gore, et Labé tel que décrit plus haut.

4.2.5 Crue maximale probable

Le calcul de la crue maximale probable (CMP) a été réalisé suite au calcul de la PMP. Cette crue permet d'aider à sélectionner la crue de conception lors des phases ultérieures de l'étude. L'analyse consiste à utiliser les conditions antécédentes de saturation du sol qui ont été établies à l'aide d'une analyse statistique sur les pluies de 8 jours. Ensuite une période de délai de 3 jours est laissée afin de bien séparer les événements pour ensuite mener à la PMP. Les trois durées suivantes de la PMP (24, 48 et 72 h) sont utilisées. Les différents cas de CMP sont modélisés à l'aide du modèle pluie-ruissellement HEC-HMS qui a été préalablement calibré sur des événements historiques. La CMP conduisant au plus fort débit est retenu.

Les résultats de la CMP choisie sont présentés à la Figure 4-10. Le débit de pointe de la CMP est de 4640 m³/s. La pointe de 10 000 ans est de 2690 m³/s. Le ratio entre la CMP et la crue de 10 000 ans est de 1,7 ce qui représente une valeur standard observée pour des bassins de taille comparable.

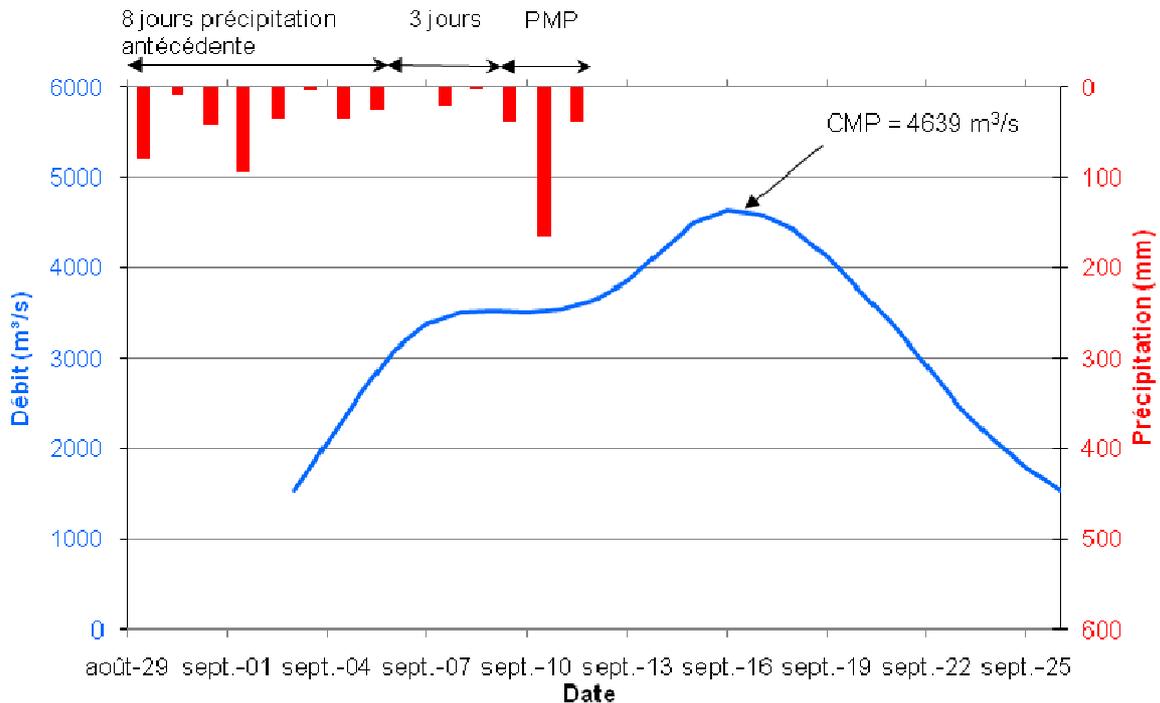


Figure 4-10 CMP de Goubassi

4.3 ÉTUDE DE L'ÉVAPORATION NETTE A GOUBASSI

Comme l'évaporation nette représente une partie importante des pertes totales du réservoir, celle-ci doit pouvoir être évaluée avec le plus de précision possible. Pour ce faire, l'ensemble des sources de données hydrologiques disponibles pour la zone a été utilisé.

L'évaporation nette d'un réservoir est définie comme étant l'évaporation de la surface d'eau du réservoir moins l'évaporation (ou évapotranspiration) qui existait dans l'emprise du réservoir avant sa mise en eau. L'évaporation nette représente la portion du débit entrant qui ne sera pas disponible pour la production ou la régularisation et elle doit donc être estimée correctement dans le bilan hydrique.

Le concept d'évaporation nette vient du fait que la création d'un réservoir n'introduit pas seulement des pertes additionnelles réduisant la proportion du débit entrant disponible mais implique qu'il crée une augmentation du débit disponible par captage de la précipitation.

C'est pourquoi lorsqu'on calcule les pertes par évaporation d'un réservoir, l'évaporation totale d'un nouveau réservoir est ajustée en soustrayant l'évapotranspiration réelle qui existait avant sa mise en eau. L'évapotranspiration réelle d'un mois donné n'est jamais connue avec précision mais dans la plupart des cas peut être approximée en appliquant un coefficient à la précipitation. Ce coefficient est estimé en prenant en compte que le coefficient de ruissellement au site de Goubassi pour la période de simulation (série de

référence de 1958 à 2004) est de 0,16. L'évapotranspiration réelle peut donc être estimée en multipliant la précipitation par un facteur de (1-0,16) soit 0,84.

Dans le cas de Gourbassi, la rivière Falémé occupe une superficie quasi négligeable en comparaison à l'étendue du réservoir proposé. Pour cette raison l'évaporation nette sera très différente de l'évapotranspiration réelle existant au réservoir avant sa réalisation. Une estimation précise de l'évaporation nette est donc primordiale afin de ne pas sous-évaluer ou surévaluer les pertes. L'évaporation totale à été calculée en utilisant une combinaison de données mesurée et calculées pour les stations de Kayes, Labé et Siguir. Les valeurs calculées ont été établies avec la méthode de Penman. Les valeurs calculées pour ces trois stations ont été pondérées afin d'établir les valeurs mensuelles les plus représentatives au site du réservoir.

Le Tableau 4-3 synthétise le calcul de l'évaporation nette pour l'aménagement de Gourbassi. L'évaporation nette est de 1147 mm/an ce qui représente un débit moyen de 6.4 m³/s soit 8,2% de débit entrant (75,3 m³/s) pour une cote de gestion maximale à 94 m s.m. (période d'analyse de 1970 à 2010).

Tableau 4-3 Évaporation nette pour le réservoir de Gourbassi

Mois	Précipitation		Évapotranspiration originale (mm)	Évaporation (mm)	Évaporation nette (mm)
	Distribution	Pluie (mm)			
Jan	0,0%	0,0	0,04	161	161
Fév	0,0%	0,5	0,41	175	174
Mar	0,1%	0,6	0,49	203	203
Avr	0,3%	3,6	3,06	211	208
Mai	4,8%	52,9	44,41	198	154
Juin	14,3%	159,2	133,74	169	35
Juil	22,7%	251,5	211,29	157	-54
Août	28,4%	315,3	264,84	161	-104
Sep	21,7%	241,3	202,67	167	-36
Oct	7,1%	79,3	66,61	170	104
Nov	0,5%	5,8	4,90	155	150
Déc	0,0%	0,1	0,08	152	152
Total	100%	1110	933	2079	1147

4.3.1 Comparaison de l'évaporation à Gourbassi avec celle de Manantali

L'évaporation nette mensuelle calculée pour le réservoir de Gourbassi a été comparée à celle du réservoir de Manantali.

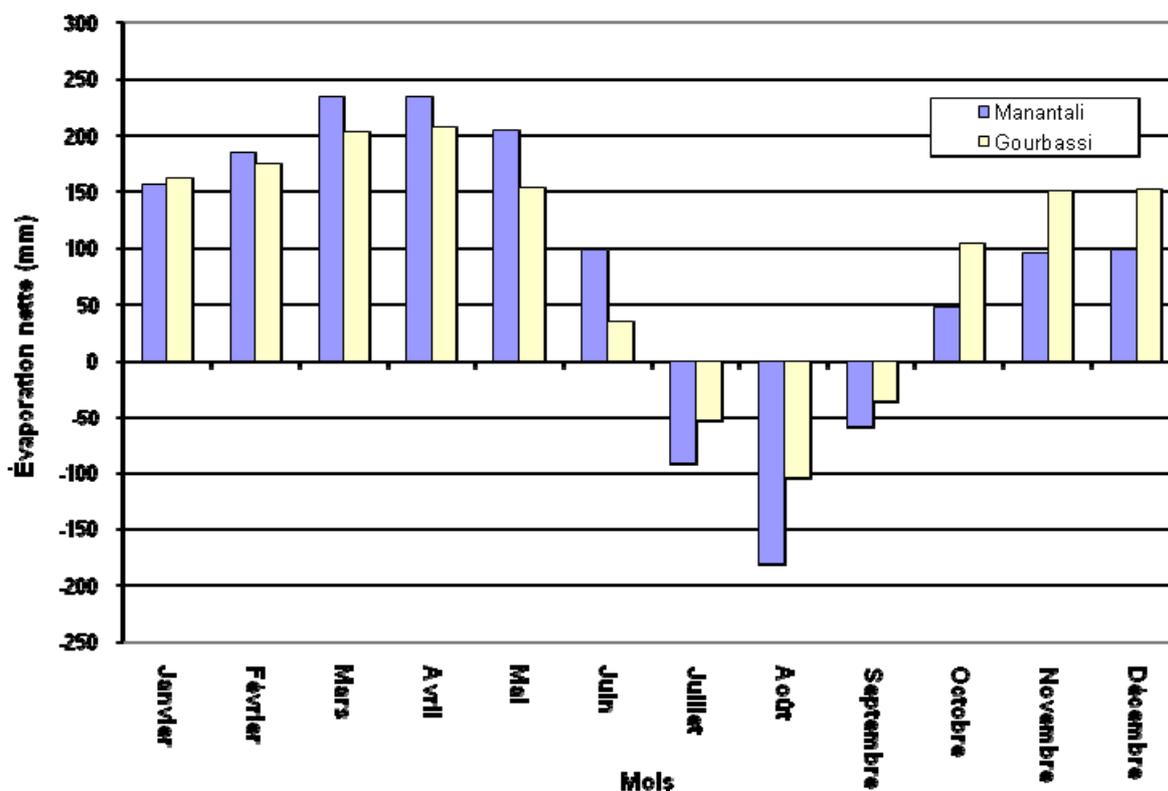


Figure 4-11 Comparaison de l'évaporation nette de Manantali et de Gourbassi

La Figure 4-11 démontre une similarité importante entre les deux réservoirs. Toutefois, le réservoir de Gourbassi subit une récupération de la précipitation plus faible que Manantali pour les mois de juillet à septembre et une évaporation nette plus importante d'octobre à décembre. Pour la période de janvier à juin, l'évaporation de Gourbassi est moins élevée. Dans l'ensemble l'évaporation annuelle de Gourbassi est de 12% plus élevé (1147 mm/an pour Gourbassi comparé à 1020 mm/an pour Manantali).

4.4 ÉTUDE DE TRANSPORT DE SÉDIMENTS

L'étude de transport de sédiments a pour but d'évaluer si le charriage et le dépôt de sédiments dans le réservoir aura un impact à long terme. Si la quantité de sédiments est importante, la réserve utile de l'aménagement pourra être affectée.

4.4.1 Données de base

Une station limnimétrique est en fonction sur la rivière Falémé au site de Gourbassi depuis 1954. Les données de débits utilisées sont celles de la base de données HYDRACCESS pour la période entre 1954 et 2010.

L'équation de la courbe de tarage de la Figure 4-12 est la suivante :

$$Q = 72,315 \times (N - 0,596)^{1,6} \quad (1)$$

Q : débit de la rivière Falémé au site de Gourbassi (m³/s)

N : niveau d'eau mesuré au limnimètre (m)

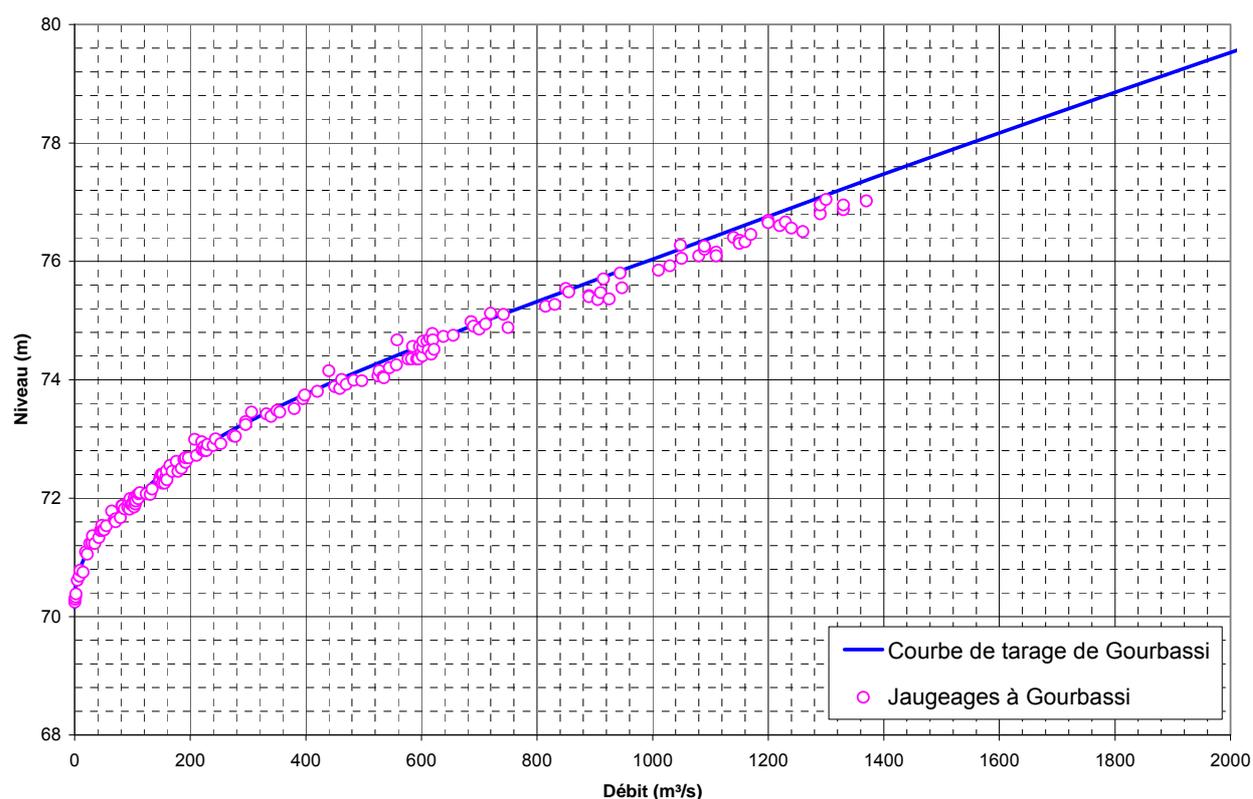


Figure 4-12 Courbe de tarage au site de Gourbassi

4.4.2 Sédiments en rivière

Tel que décrit précédemment un programme de mesure de la charge solide à Gourbassi a été mis en place spécifiquement pour le projet. Les mesures effectuées comprenaient outre la charge solide, le niveau d'eau indiqué par le limnimètre installé au village de Berola (ex-Gourbassi). Ces données ont permis de déterminer le débit de la rivière à l'aide de la courbe de tarage et de développer la courbe de tarage en sédiments.

4.4.3 Courbe de tarage de sédiments

L'analyse de la concentration en sédiments en fonction du débit réalisée suite au programme d'échantillonnage permet d'établir une relation concentration-débit. Toutefois cette relation comporte une certaine imprécision étant donné le faible nombre de points mesurés. En vue d'obtenir une estimation conservatrice des conditions de sédimentation au site, la courbe de tarage en sédiments établie n'est pas le résultat du meilleur ajustement mais plutôt d'une maximisation de la concentration. L'équation de cette courbe est la suivante :

$$Conc = 0,4 \times Q^{1.2} \quad (2)$$

Conc : charge totale en sédiments en ppm (ou mg/l)

Q : débit de la rivière (m³/s)

Étant donné le faible nombre de mesure de charge solide disponibles et le fait que le programme d'échantillonnage ne s'échelonnait pas sur plusieurs années, une approche conservatrice a du être retenue lors de l'analyse des résultats.

La relation développée représente la courbe de tarage en sédiments (Équation 2) qui est une courbe enveloppe maximisant la quantité de sédiments en rivière tout en demeurant à l'intérieur des valeurs physiquement possibles.

4.4.4 Courbes d'emménagement du réservoir

La courbe d'emménagement du réservoir précédemment établie par SENEGAL-CONSULT sur la base d'une restitution topographique du bassin au 1:20 000^e avec courbes de niveau équidistantes de 5 m est montrée à la Figure 4-13. Les relations niveau-surface et niveau-volume ont été mises à jour suite à la réception des données topographiques de l'IGN en décembre 2010. À partir de ces données, SLII a préparé un modèle numérique de terrain qui lui a permis de retracer ces courbes.

L'analyse des résultats issus des données reçues de l'IGN a permis de déterminer que des imprécisions notables existaient sur la courbe d'emménagement établie par SENEGAL-CONSULT tel qu'on peut le constater sur la Figure 4-14 et la Figure 4-15.

Afin de pouvoir valider la courbe d'emménagement de SENEGAL-CONSULT, SLII a effectué une intégration de la courbe élévation-surface de 1970 sans pouvoir obtenir une courbe d'emménagement qui corresponde à celle de 1970.

La courbe établie suite à la numérisation des données topographiques sera donc utilisée dans cette étude. De plus, en cartographiant l'étendue de la zone inondée par le réservoir et en la comparant aux photos aériennes, il apparaît clairement que le modèle numérique de terrain de 2010 donne une zone d'inondation mieux définie que ce qui avait été effectué en 1970.

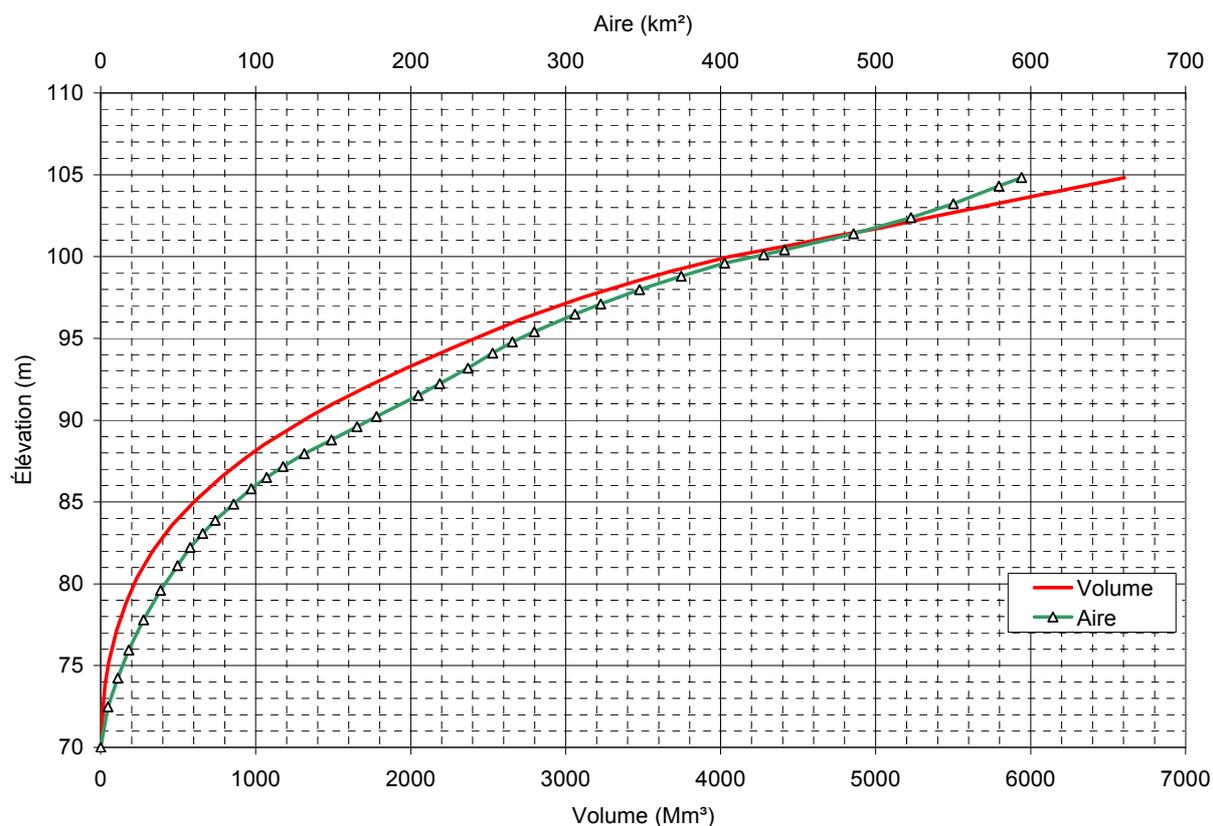


Figure 4-13 Courbe d'emmagasinement de la retenue selon Senco (1970)

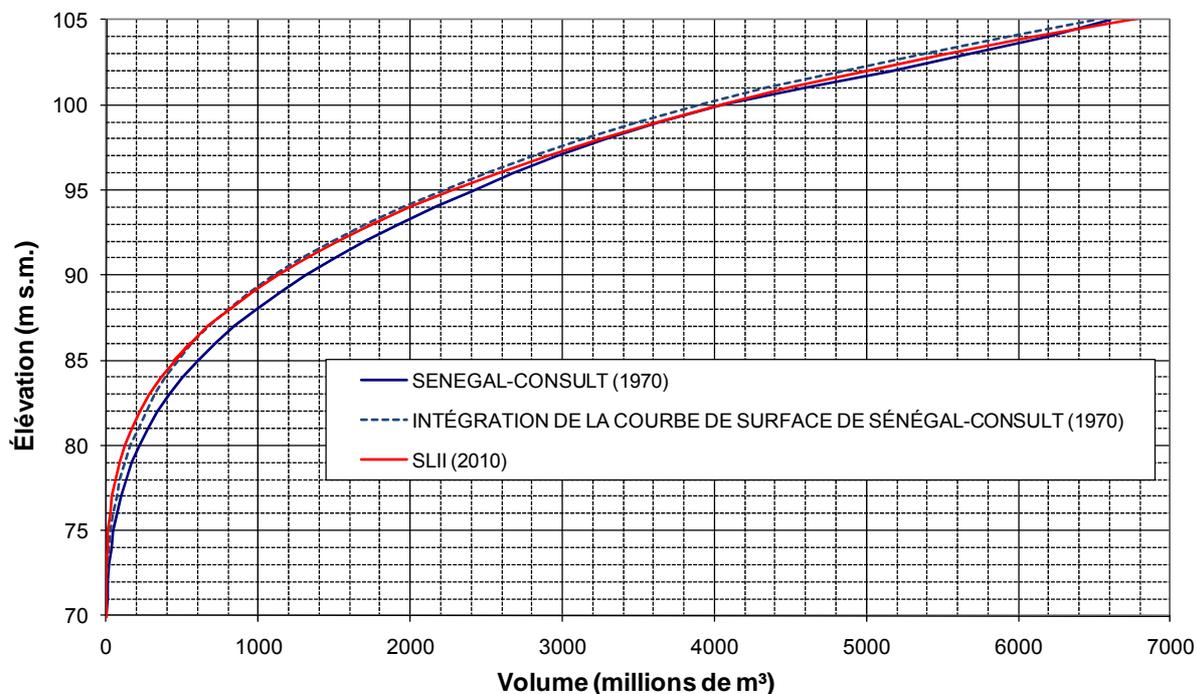


Figure 4-14 Retenue de Gourbassi – Volume

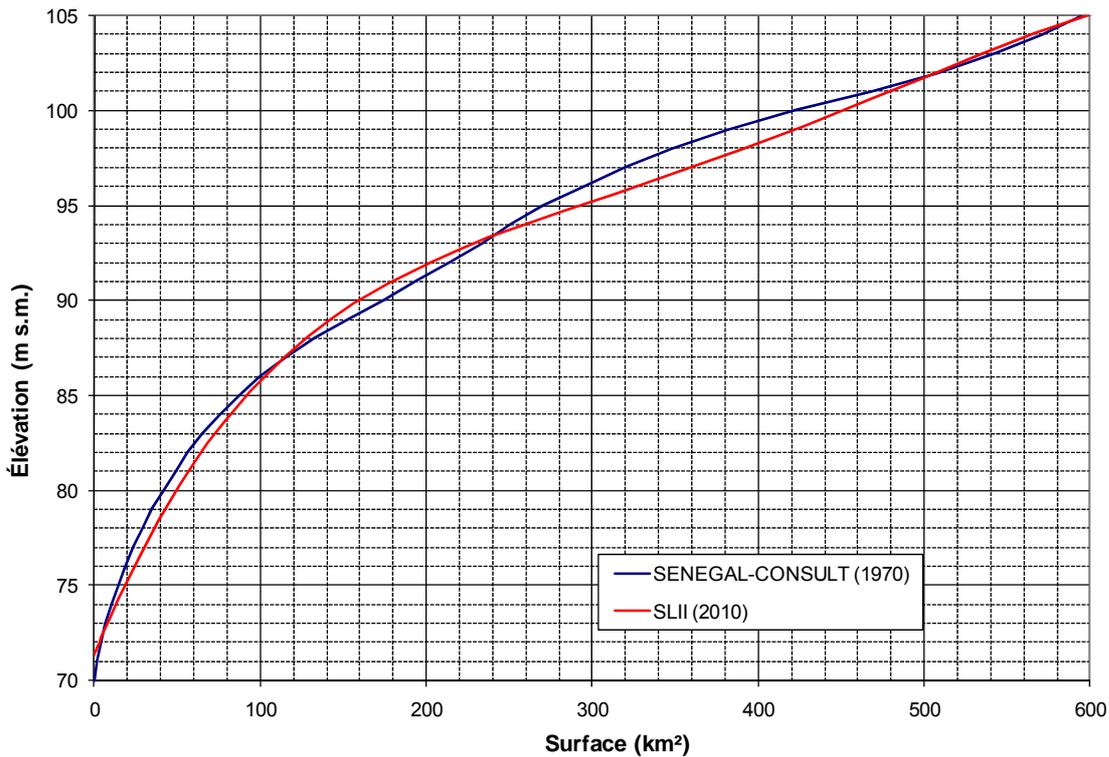


Figure 4-15 Retenue de Gourbassi – Surface

4.4.5 Méthodologie de l'étude de sédimentation

L'accumulation de sédiments dans la retenue de l'aménagement de Gourbassi sur une période de 100 ans a été évaluée en utilisant la méthode empirique de réduction d'aire, « *Empirical Area Reduction Method* » [Réf. 29]. Cette méthode permet de déterminer la distribution des sédiments dans un réservoir et l'impact sur le volume d'emmagasinement et, plus spécifiquement, sur la réserve utile.

Remarque importante : Selon cette méthode américaine, tous les calculs ont été fait en unités du système impérial ; seuls les résultats finaux ont été convertis dans le système S.I.

4.4.6 Étapes

4.4.6.1 Taux de décantation

Le taux de décantation d'un réservoir est défini par le rapport entre la quantité de sédiments entrants et sortants du réservoir au niveau maximum d'exploitation [Réf. 3].

Pour un rapport entre la capacité du réservoir et les apports en sédiments de 180, le taux de décantation est estimé à 100%. Ainsi tous les sédiments qui arrivent dans le réservoir sont déposés.

4.4.6.2 Poids volumique

À partir des données de débits et de la courbe de tarage, il est possible de déterminer la quantité de sédiments qui se déposent dans le réservoir en termes de tonnes/jour. Pour pouvoir convertir cet apport en volume des dépôts, il faut déterminer le poids volumique initial des sédiments W_1 et ensuite leur poids final W_T après 100 ans de consolidation en utilisant les relations suivantes :

$$W_1 = W_{\text{argile}} \times p_{\text{argile}} + W_{\text{silt}} \times p_{\text{silt}} + W_{\text{sable}} \times p_{\text{sable}} \quad (3)$$

$W_{\text{argile}}, W_{\text{sable}}, W_{\text{silt}}$: poids volumiques respectifs de l'argile, du sable, et du silt selon le mode d'opération du réservoir

$p_{\text{argile}}, p_{\text{sable}}, p_{\text{silt}}$: fractions respectives de l'argile, du sable, et du silt

et :

$$W_T = W_1 + 0.4343K \left[\frac{T}{T-1} (\log_e T) - 1 \right] \quad (4)$$

W_1 : poids volumique initial des sédiments tels que calculé dans l'équation (3) après T années d'opération

K : constante basée sur le type d'opération du réservoir et l'analyse de la taille des sédiments (=1,98)

En considérant que le mode d'exploitation du réservoir prévoit des variations de niveau modérées, il est considéré de type II (cf. Tableau 4-4 plus bas).

Les résultats d'une campagne de prospection menée par SÉNÉGAL-CONSULT donnent une fraction argileuse de 10 à 15% pour le sol du site. La granulométrie supposée est donc la suivante :

$$\begin{aligned} p_{\text{argile}} &= 0,15 & W_{\text{argile}} &= 1520 \text{ kg/m}^3 \text{ (95 lb/pi}^3\text{)} \\ p_{\text{sable}} &= 0,45 & W_{\text{sable}} &= 1550 \text{ kg/m}^3 \text{ (97 lb/pi}^3\text{)} \\ p_{\text{silt}} &= 0,40 & W_{\text{silt}} &= 1140 \text{ kg/m}^3 \text{ (71 lb/pi}^3\text{)} \end{aligned}$$

Ainsi : $W_1 = 1237,7$ (77,3 lb/pi³)

et $W_T = 1251,7$ kg/m³ (78,2 lb/pi³)

4.4.6.3 Volume total des dépôts sur 100 ans

Le volume de sédiments déposé pour une période de 100 ans a été calculé en utilisant les données journalières de débits au site de Gourbassi entre le 1^{er} mai 1953 et le 30 avril 2004 soit une période de 50 ans. Le débit journalier moyen pour cette période est de 105 m³/s.

En utilisant le poids volumique calculé ci-dessus, le volume total de sédiments est de 219 millions de m³ (soit 177 505 acres-pieds), ce qui correspond à 9,1% du volume total du réservoir et 11,8% du volume utile, pour une cote de getsion maximale à 94 m s.m. et un niveau minimum d'exploitation fixé à 85 m s.m.

4.4.6.4 Accumulation des sédiments

La méthode de réduction d'aire présuppose une relation entre la forme du réservoir et le pourcentage de sédiments qui se déposent à différentes profondeurs du réservoir.

4.4.6.5 Données pertinentes

Les hypothèses prises pour l'étude sont les suivantes :

- Cote de la base du barrage : 68,5 m s.m. (224,7 pi)
- Profondeur maximale de la retenue au barrage : 27 m (88.6 pi)
- Volume de sédiments accumulés sur 100 ans : 219 millions de m³
- Variation du niveau de la retenue : entre 94 m s.m. (cote de gestion maximale – 308 pi) et 95,5 m s.m. (niveau maximal de la retenue – 313 pi)

4.4.6.6 Type de réservoir

Le Tableau 4-4 présente la classification normalisée des réservoirs. La méthode proposée pour l'exploitation du réservoir est de type II, en raison d'un marnage modéré. Le type de forme du réservoir est déterminé par le facteur m qui équivaut à l'inverse de la pente de la courbe représentant la hauteur du barrage en fonction de la capacité (Figure 4-16). La réciproque de la pente de la courbe m est 4,13, donc la forme du réservoir est de type I. Dans le cas de Gourbassi, la forme du réservoir est jugée prépondérante dans la répartition des sédiments et le type pondéré du réservoir est sélectionné comme étant I.

Tableau 4-4 Classification des réservoirs²⁷

Exploitation du réservoir		Forme			Type pondéré
Classe	Type	Classe	Type	Classe	
Submergé de sédiments	I	Lac	3,5 – 4,5	I	I
		Contreforts de plaine d'inondation	2,5 – 3,5	II	I ou II
		Colline	1,5 – 2,5	III	II
		Gorge	1 – 1,5	IV	III
Marnage modéré	II	Lac	3,5 – 4,5	I	I ou II
		Contreforts de plaine d'inondation	2,5 – 3,5	II	II
		Colline	1,5 – 2,5	III	II ou III
		Gorge	1 – 1,5	IV	III
Marnage considérable	III	Lac	3,5 – 4,5	I	II
		Contreforts de plaine d'inondation	2,5 – 3,5	II	II ou III
		Colline	1,5 – 2,5	III	III
		Gorge	1 – 1,5	IV	II ou IV
Normalement vide	IV	Lac	3,5 – 4,5	I	IV
		Contreforts de plaine d'inondation	2,5 – 3,5	II	IV
		Colline	1,5 – 2,5	III	IV
		Gorge	1 – 1,5	IV	IV

²⁷ Source : U.S. Bureau of Reclamation

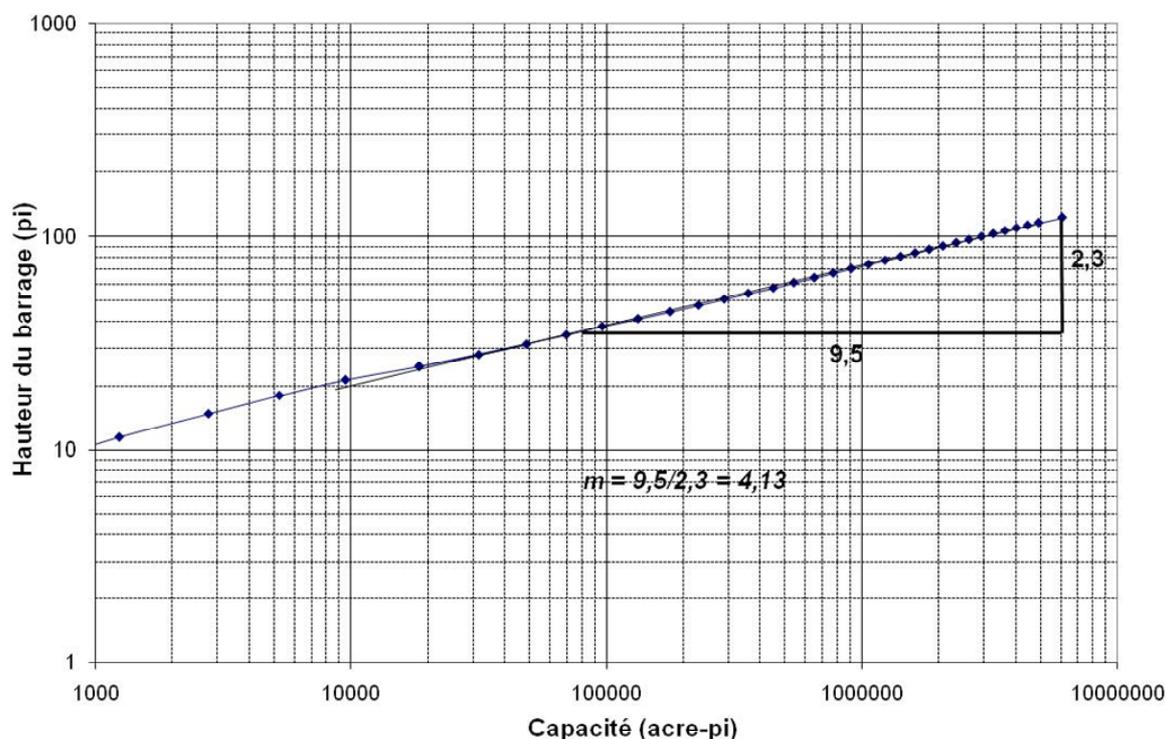


Figure 4-16 Coefficient de classification du réservoir de Gourbassi

4.4.6.7 Profondeur des dépôts au barrage

La procédure de calcul est basée sur la relation suivante :

$$\frac{1-v_0}{a_0} = \frac{S-V_0}{HA_0} \quad (5)$$

- v_0 : volume relatif du réservoir à la nouvelle profondeur zéro après la période de sédimentation
- a_0 : aire relative du réservoir à la nouvelle profondeur zéro
- S : total des sédiments accumulés
- H : profondeur initiale du réservoir (profondeur maximale de la retenue au barrage)
- V_0 : volume relatif du réservoir à la nouvelle profondeur zéro après la période de sédimentation
- A_0 : aire totale du réservoir à la nouvelle profondeur zéro après la période de sédimentation

En en définissant par la suite deux nouveaux termes :

$$h_p = \frac{1 - v_p}{a_p} \quad (6)$$

et :

$$h'_p = \frac{S - V_{pH}}{HA_{pH}} \quad (7)$$

p : profondeur relative du réservoir

V_{pH} : volume total du réservoir à la profondeur pH

A_{pH} : aire totale du réservoir à la profondeur pH

Des courbes donnant la fonction h_p en fonction de pH selon le type de réservoir ont été conçues suite à l'observation de données de multiples réservoirs.

Ainsi le Tableau 4-5 donne le calcul des valeurs de la fonction h'_p pour le réservoir de Gourbassi. Tel que montré à la figure 4 15, ces résultats ont ensuite été superposés à la courbe donnant h_p (pour un réservoir de type II) afin de déterminer l'intersection des deux courbes et par la même occasion la profondeur relative à laquelle vont se déposer les sédiments.

Tableau 4-5 Détermination directe de la profondeur du dépôt de sédiments au barrage

Cote (m s.m.)	A_{pH} (m ²)	V_{pH} (m ³)	p	$S - V_{pH}$	HA_{pH}	h'_p
68,80	408	65	0,011	219 052 900	0,01	19 895,461
69,05	10 011	2614	0,020	219 050 351	0,27	810,411
69,30	56 570	15 127	0,030	219 037 838	1,53	143,406
69,55	103 130	27 640	0,039	219 025 325	2,78	78,659
69,80	149 689	40 154	0,048	219 012 811	4,04	54,190
70,05	217 675	71 250	0,057	218 981 715	5,88	37,259
70,30	371 368	176 676	0,067	218 876 289	10,03	21,829
70,55	525 062	282 101	0,076	218 770 864	14,18	15,432
70,80	678 755	387 527	0,085	218 665 438	18,33	11,932

$p_0 = 0,05$

$p_H = 1,35$ m

Fond du réservoir = 68,5 m s.m.

Niveau des sédiments déposés au barrage = 69,85 m s.m.

Une fois déterminé le nouveau fond du réservoir, le calcul du volume utile révisé se fait selon la méthode de réduction d'aire.

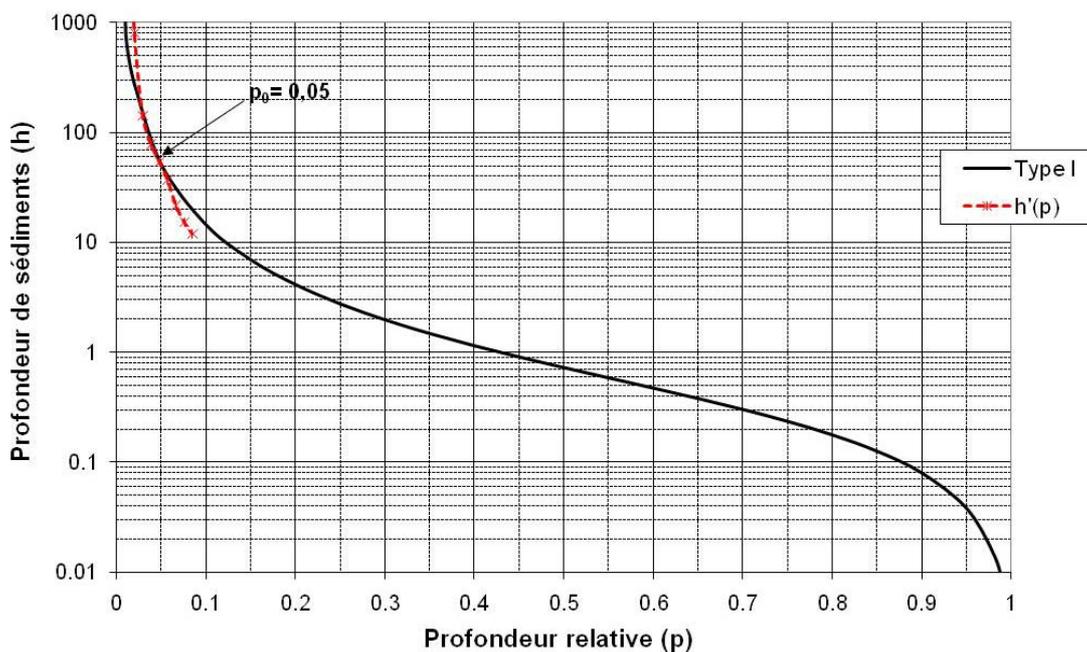


Figure 4-17 Profondeur des sédiments dans le réservoir de Gourbassi

4.4.7 Analyse des résultats

La nouvelle courbe d'emmagasinement ainsi révisée après 100 ans d'accumulation de sédiments est donnée à la Figure 4-18 (courbes initiales et finales). A la cote de gestion maximale de 94 m s.m., la capacité d'emmagasinement du réservoir est réduite de 10.3% ; elle est réduite de 5.4% à la cote de 100 m s.m.

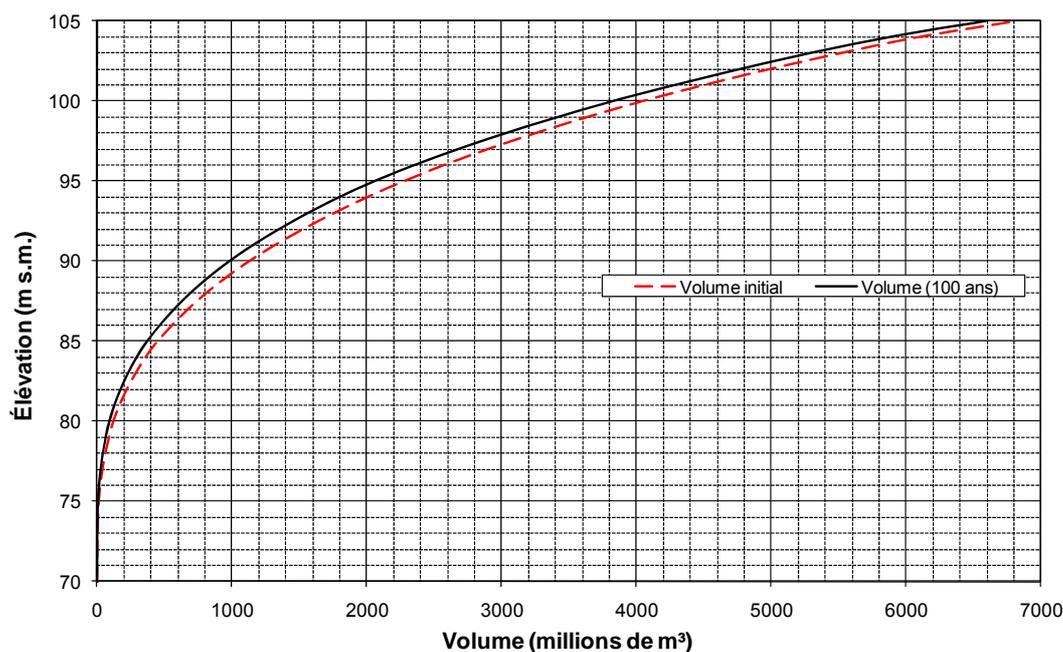


Figure 4-18 Courbe d'emmagasinement après 100 ans de sédimentation

CHAPITRE 5

Régularisation des débits et simulation du potentiel de production

5. RÉGULARISATION DES DÉBITS ET SIMULATION DU POTENTIEL DE PRODUCTION

5.1 SIMULATION DE REGULARISATION DE LA RIVIERE FALEME ET DU FLEUVE SENEGAL

La régularisation des débits au site de Gourbassi doit être effectuée dans le but de satisfaire un ensemble d'objectifs établis pour le Haut Bassin du fleuve Sénégal qui sont en partie communs à ceux de l'aménagement de Manantali. Ces objectifs concernent les points suivants²⁸ :

- Assurer un soutien à l'étiage, c'est-à-dire assurer un débit garanti à Bakel pour les besoins domestiques, maintenir l'irrigation et la navigation, assurer un soutien aux faibles crues (assurer une submersion suffisantes des plaines inondables pour permettre la culture de décrue selon un hydrogramme prédéfini) ;
- Laminer les pointes des fortes crues à Bakel en dessous d'une valeur limite de 4500 m³/s
- Produire de l'énergie hydroélectrique.

Les simulations ont été réalisées en utilisant la série de base de 1961 à 2009. L'objectif est de satisfaire en tous temps ces besoins en eau y compris ceux liés à l'irrigation des terres et aux besoins de la population et du bétail vivant en proximité du réservoir.

Il est important de noter que la simulation de la gestion de la retenue doit respecter toutes les contraintes physiques de l'aménagement en permanence, soit la cote de gestion maximale, la capacité d'évacuation et le débit maximal qui peut être turbiné.

Des études récentes menées par l'IRD [Réf. 10] ont évalué une grande variété de règles de gestion selon diverses combinaisons pour l'ouvrage de Manantali. L'étude de Bader [Réf. 2] comprenait notamment différents hydrogramme de crues artificielle (Orstom fixe, Orstom mobile, Gibson A) menant au calcul d'un productible garanti et permettant de quantifier les pertes de production d'énergie reliées aux différents lâchers d'eau.

Une analyse statistique permet de quantifier l'impact de Manantali sur le régime hydrologique à Bakel. Ces études comprennent également différents modèles de propagation des crues assez similaires à l'étude de Bader pour l'ensemble du bassin. Le rapport de l'IRD établit notamment quelles sont les règles de gestion optimale du barrage de Manantali lorsqu'un système de prévisions des crues sur 10 jours est implanté.

La réalisation de l'aménagement de Gourbassi permettra d'augmenter le niveau de satisfaction des multiples objectifs au niveau de Bakel. La quantification de l'impact d'une retenue à Gourbassi doit prendre en compte le fait que l'exploitation de cet aménagement sera réalisée en combinaison avec Manantali. Pour cette raison, SLII a réalisé une simulation de l'exploitation de l'aménagement de Manantali selon les règles de gestion actuelles et en utilisant le modèle de propagation des débits sur le bassin développé par l'IRD.

²⁸ Ces objectifs de gestion sont décrits en détail dans les documents [Réf. 2], [Réf. 10] et [Réf. 16].

Les résultats de l'opération simulée de Manantali ont été comparés à ceux des études précédentes afin de s'assurer de la validité de la technique de modélisation employée. Il a été ensuite possible de préparer le modèle représentant l'exploitation combinée de Goubassi et Manantali.

Certains des objectifs proposés ne sont pas complémentaires et peuvent être en opposition les uns par rapport aux autres ; ce qui demande de fixer un ordre de priorités. L'approche proposée est de calculer le taux d'échec de rencontre des objectifs sur la période de simulation totale.

L'impact d'une retenue à Goubassi est évalué en effectuant la comparaison du régime régularisé au régime naturel à Bakel. Cette analyse est réalisée dans un premier temps pour Manantali seul afin de valider le modèle de simulation et ensuite pour la gestion combinée. L'impact de l'exploitation de Goubassi est alors comparé au régime régularisé par Manantali à Bakel et au régime naturel. Une analyse statistique similaire à celle des études précédentes [Réf. 16] a été réalisée avec et sans Goubassi afin de quantifier l'impact à Bakel en ce qui a trait à la satisfaction des multiples objectifs.

5.1.1 Objectifs et contraintes de régularisation du réservoir de Goubassi

Les objectifs de régularisation de l'aménagement de Goubassi sont communs à ceux de Manantali. L'impact de l'aménagement de Goubassi est évalué au niveau de Bakel.

5.1.1.1 Contraintes de régularisation

Les contraintes de régularisation sont liées aux caractéristiques physiques de l'aménagement : puissance installée à l'usine (débit maximal et minimal turbiné), la taille du réservoir et celle des organes d'évacuation.

Ces contraintes permettent d'assurer qu'en tous temps, le réservoir est maintenu sous la cote maximale extrême afin d'assurer l'intégrité des ouvrages et au dessus de la cote minimale d'exploitation afin d'éviter l'érosion de la zone située sous le parement amont.

Pour Goubassi, les hypothèses prises pour ce qui concerne les contraintes de régularisation sont les suivantes (cas de base) :

- Cote de gestion maximale (CG_{Max}) : 94 m s.m.
- Cote de gestion minimale (CG_{min}) : 85 m s.m.
- Volume utile : 1.6 milliards de m^3
- Puissance installée : 21 MW
- Débit turbiné nominal : 90 m^3/s
- Débit minimal turbiné : 50 m^3/s réparti au prorata des volumes utiles des deux réservoirs
- La courbe d'emmagasinement est celle présentée à la Figure 4-14.

Pour Manantali, les contraintes de régularisation pour le cas de base sont présentées ci-dessous :

- Cote de gestion maximale : 208 m

- Cote de gestion minimale : 187 m
- Volume utile : 7.7 milliards de m³
- Puissance installée : 200 MW
- Débit turbiné nominal : 450 m³/s
- Débit minimal turbiné : 50 m³/s réparti au pro rata des volumes utiles des deux réservoirs

5.1.1.2 Objectifs de la régularisation

Les objectifs de la régularisation sont similaires à ceux de Manantali, la plupart de ces objectifs étant adaptée de l'étude de Bader ainsi que de celle de l'IRD. Plusieurs objectifs concernent les débits à Bakel étant donné que l'impact de la retenue est normalement mesuré à cet endroit. De plus, les cultures de décrue se font principalement le long du fleuve Sénégal dans la région de Bakel et cette zone est la plus densément peuplée de la zone d'étude. Un facteur de minoration de 0,7 a été appliqué aux objectifs établis initialement par Bader afin d'obtenir une représentation réaliste de la gestion de Manantali. Les résultats de la simulation de Manantali avec les objectifs révisés comparé au régime réel démontrent que cette minoration est justifiée. Utiliser les objectifs initiaux conduirait à la vidange du réservoir assez rapidement au cours d'une succession de périodes sèches. La liste des objectifs de la régularisation est présentée ci-dessous par ordre de priorités :

- 1) Assurer la satisfaction des besoins en eau sur la Falémé. Le Tableau 5-1 présente le détail des besoins pour toutes les catégories ;
- 2) Assurer la satisfaction des besoins en eau à Bakel (Tableau 5-2) ;
- 3) Respecter le débit maximal de crue de 4500 m³/s à Bakel ;
- 4) Respecter le débit maximal de crue de 2000 m³/s à Manantali ;
- 5) Respecter un débit constant pour la satisfaction de la demande énergétique ;
- 6) Assurer un hydrogramme de crue artificielle pour permettre la culture de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal (l'hydrogramme de crue est présenté à la Figure 5-1) ;
- 7) Assurer un débit minimal constant de 50 m³/s pour la gestion combinée des deux retenues de Gourbassi et Manantali afin d'éviter un assèchement en aval du barrage. Le débit est distribué au prorata du pourcentage de la réserve utile restante.

Tableau 5-1 Récapitulatif des besoins en eau sur la Falémé

Mois	Besoins bruts pour l'irrigation (m ³ /s)	Évaporation sur la Falémé (m ³ /s)	Besoins en eau pour le cheptel (m ³ /s)	Mines (m ³ /s)	Total (m ³ /s)
Janvier	1,2	1,5	0,0	0,1	2,7
Février	1,4	1,5	0,5	0,1	3,5
Mars	0,3	1,0	0,6	0,1	1,9
Avril	0,0	0,8	0,6	0,1	1,4
Mai	0,0	0,6	0,6	0,1	1,3
Juin	2,6	1,5	0,3	0,1	4,5
Juillet	0,4	1,2	0,0	0,1	1,6
Août	0,3	-0,3	0,0	0,1	0,1
Septembre	1,0	0,5	0,0	0,1	1,6
Octobre	2,0	1,3	0,0	0,1	3,4
Novembre	0,5	1,9	0,0	0,1	2,5
Décembre	0,7	1,5	0,0	0,1	2,2

Tableau 5-2 Récapitulatif de la demande en eau pour l'irrigation, les besoins domestiques et la navigation à Bakel²⁹

Mois	Irrigation de 140 000 ha et 10 m ³ /s pour usages domestiques (m ³ /s)	Hydrogramme crue type Gibson A au niveau de Bakel, permettant la culture de décrue sur 35 000 ha et besoins pour la navigation (m ³ /s)
Janvier	47	140
Février	114	140
Mars	141	140
Avril	143	140
Mai	126	140
Juin	109	140
Juillet	102	140
Août	193	272
Septembre	238	1213
Octobre	217	562
Novembre	145	175
Décembre	68	140
Annuel	137	257

²⁹ Les résultats incluent le facteur de minoration de 0,7 indiqué au § 5.1.1.2

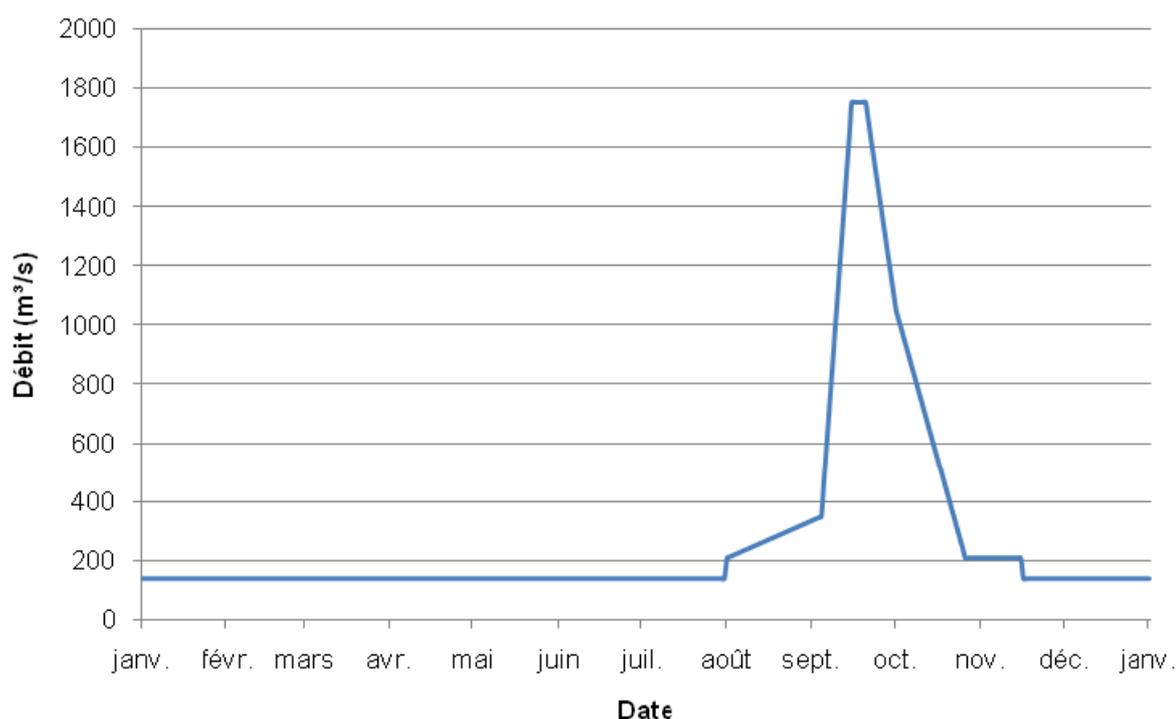


Figure 5-1 Hydrogramme de crue pour la culture de décrue – Gibson A

5.1.2 Gestion actuelle du réservoir de Manantali

La simulation de gestion de Manantali est effectuée au pas de temps journalier. Les contraintes d'exploitation et objectifs de la régularisation sont tels que présentés plus haut.

Selon les résultats d'exploitation de Manantali tirés de la base de données HYDRACCESS, il a pu être constaté que l'hydrogramme de crue artificielle n'est pas systématiquement assuré chaque année par Manantali. Ceci est possiblement dû à une priorisation différente des objectifs de la retenue. La production énergétique est possiblement prioritaire pour certaines années lorsque le volume entrant est faible.

L'étude actuelle a eu pour objectif de reproduire principalement les neuf dernières années de gestion de Manantali pour lesquelles il y a eu génération d'électricité. La variation annuelle du niveau du réservoir tel que modélisé a été comparée à la variation mesurée.

Afin d'assurer une bonne corrélation entre le modèle et les valeurs mesurées, la série de règles de gestion (objectifs de régularisation) permettant de reproduire au mieux les valeurs mesurées a été utilisée. Les Figure 5-2, Figure 5-3 et Figure 5-4 représentent la variation annuelle du niveau du réservoir. Bien que des différences entre le modèle et la réalité subsistent toujours, la corrélation du modèle aux mesures est jugée bonne. Il est important de noter que l'exploitation de Manantali ne suit pas toujours parfaitement les règles de gestion préétablie. Ceci concerne particulièrement l'hydrogramme de crue artificielle qui n'est pas respecté chaque année. La raison qui justifie cette décision est possiblement due à la variation annuelle du régime hydrologique, des besoins

potentiellement plus importants que prévus initialement, ainsi qu'à la fluctuation de la demande énergétique.

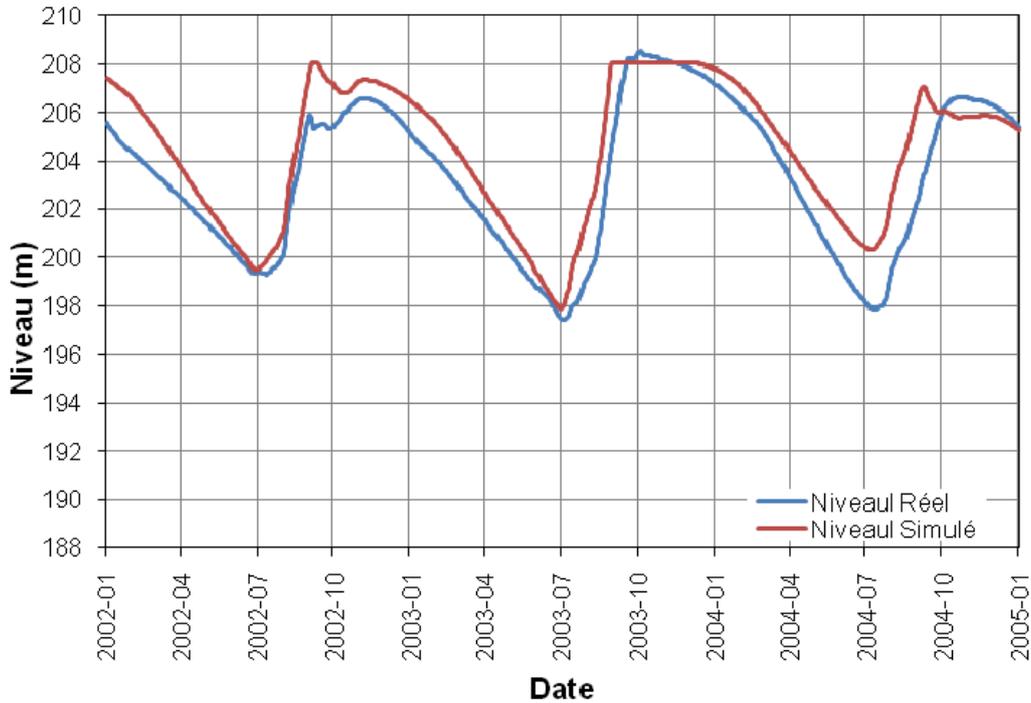


Figure 5-2 Simulation de la gestion de Manantali (2002-2004)

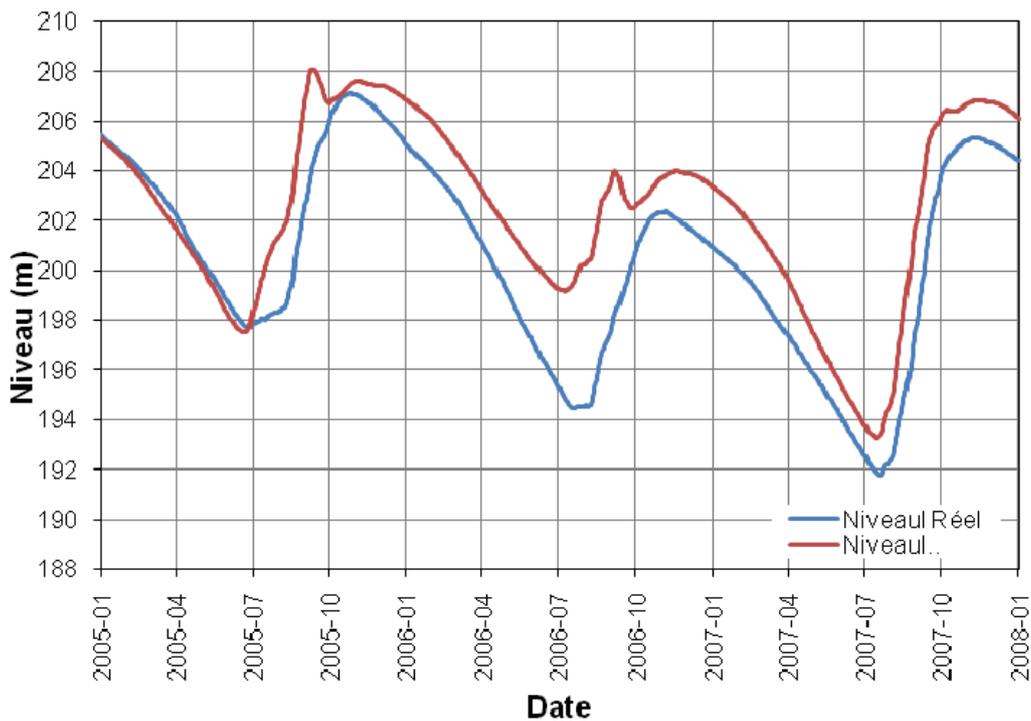


Figure 5-3 Simulation de la gestion de Manantali (2005-2007)

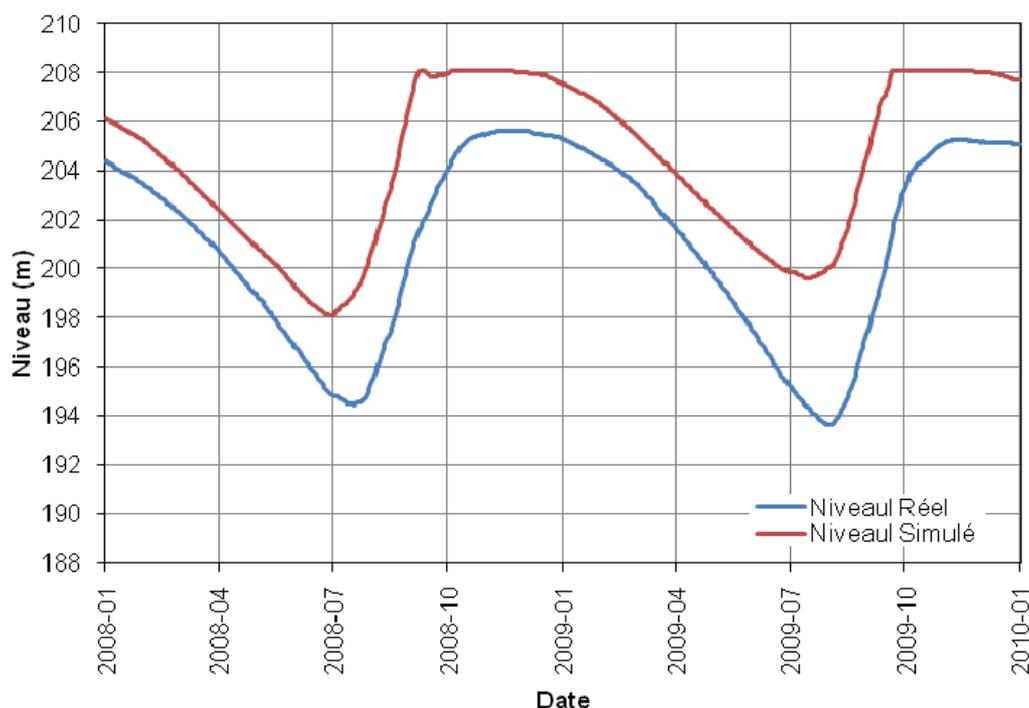


Figure 5-4 Simulation de la gestion de Manantali (2008-2009)

5.1.3 Principes, paramètres et méthodologie de régularisation avec Gourbassi

Lors de la gestion combinée de Manantali et de Gourbassi, les objectifs de débits à Bakel sont maintenus. Le pourcentage de satisfaction de ces besoins est toutefois augmenté de par la plus grande réserve utile combinée. Les besoins en eau dans le bassin de la Falémé sont prioritaires mais vu la faible demande ceux-ci peuvent être maintenus sans problèmes.

La logique de gestion des deux aménagements est selon le mode parallèle pour lequel le pourcentage du volume utile des deux aménagements doit être maintenu constant sur une base journalière. Dans les simulations, il existe des écarts sporadiques entre les deux réservoirs mais ceux-ci sont rapidement ramenés à 0.

La satisfaction des besoins en eau à Bakel est assurée par chacun des barrages en utilisant une répartition du débit requis au prorata du volume utile total.

5.1.4 Simulations de gestion de Gourbassi

La simulation de la gestion de Gourbassi a été réalisée en utilisant les règles de gestion présentées plus haut (§ 5.1.1). Une série chronologique sur un an a été préparée afin de démontrer la variation de niveau dans le réservoir ainsi que le débit en condition naturelles et le débit simulé de la gestion du réservoir. La Figure 5-5 présente les résultats de simulation pour une année normale, la Figure 5-6 pour une année sèche et la Figure 5-7 pour une année humide.

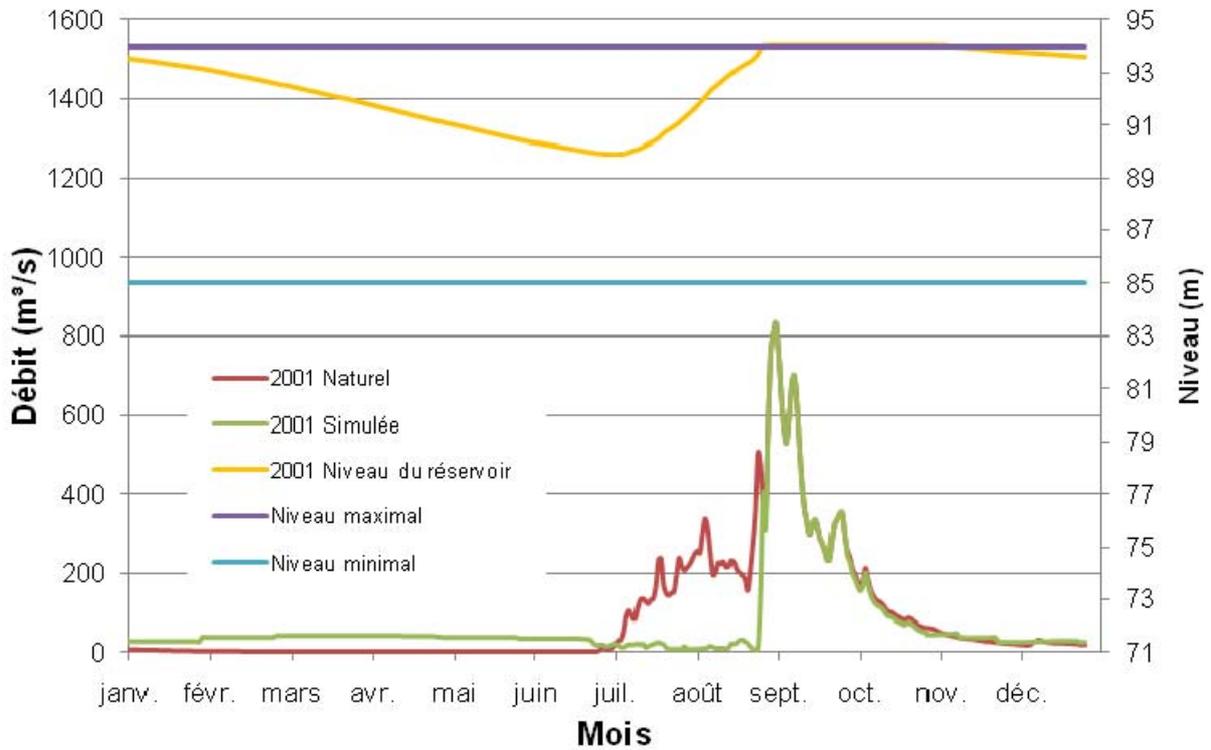


Figure 5-5 Gestion de Goubassi – Année normale

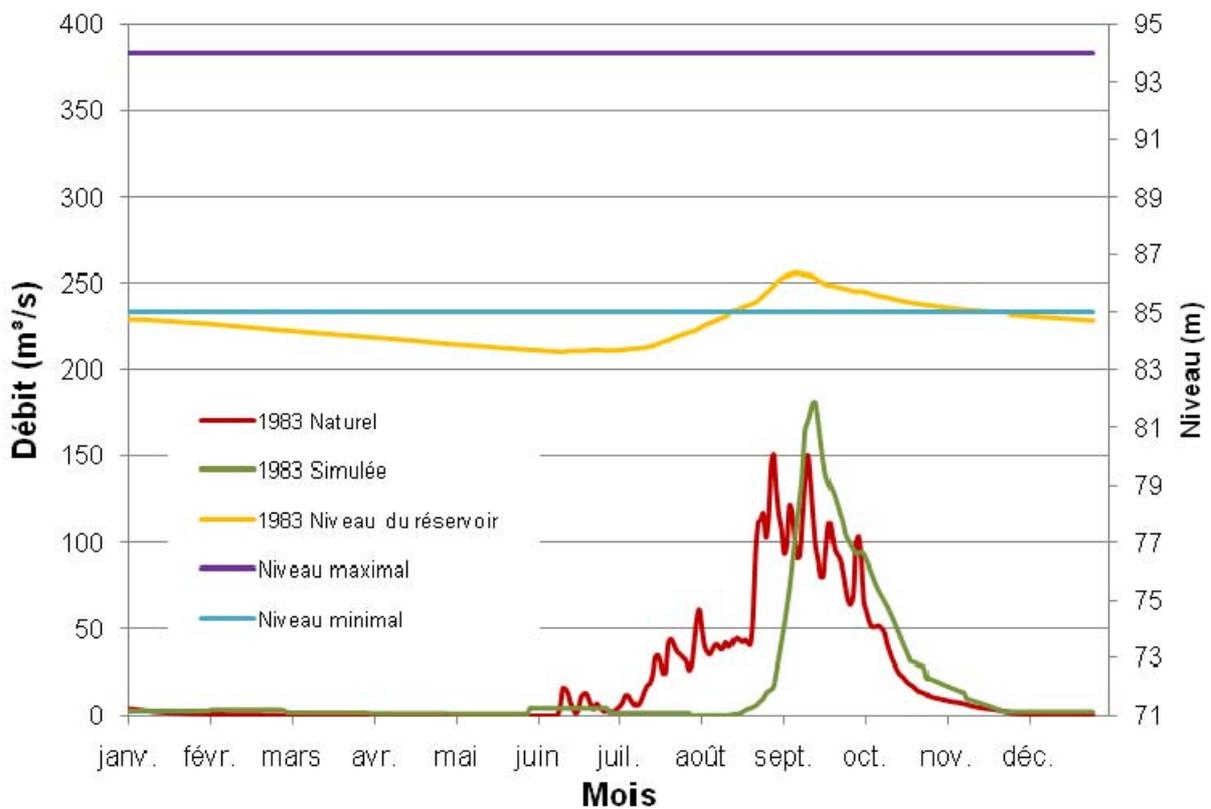


Figure 5-6 Gestion de Goubassi – Année sèche type

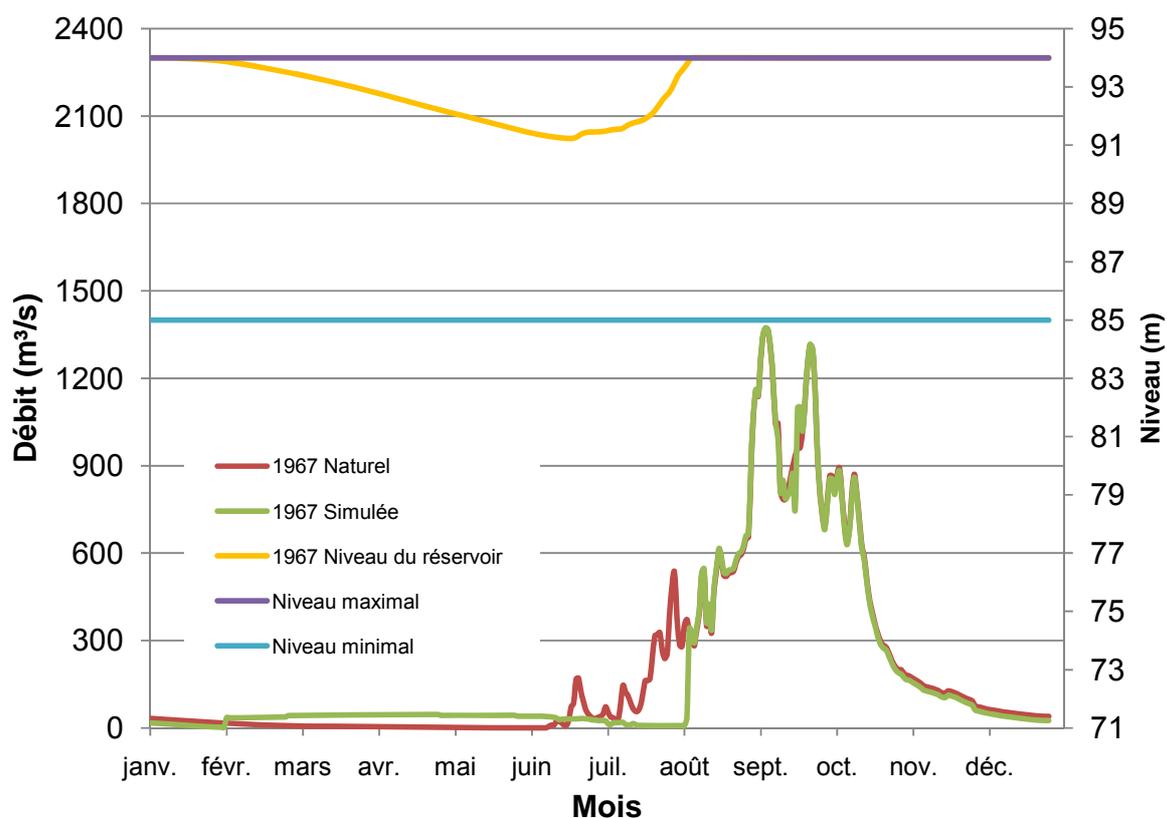


Figure 5-7 Gestion de Gourbassi – Année humide type

5.1.5 Synthèse des résultats

Les résultats de la gestion combinée de Manantali et de Gourbassi sont analysés sous plusieurs aspects. Tout d'abord, SENEGAL-CONSULT proposait en 1970 une méthode d'évaluation de l'efficacité de la régularisation basée sur un calcul du nombre d'occurrence d'un débit sous un seuil prédéterminé. Cette méthode est la première à avoir été utilisée dans la présente étude pour caractériser l'efficacité de la régularisation.

La définition exacte du taux d'efficacité de la régularisation est donnée ci-dessous.

Le calcul du taux d'efficacité consiste à calculer le nombre de jours où le débit est inférieur à une valeur cible. Dans le cas de la gestion combinée, cette valeur est de 250 m³/s comparativement à une valeur de 200 m³/s pour Manantali seul. Un taux d'échec de 10% du débit cible est admis. Les jours où le débit est de 90% du débit cible seront comptabilisés. Le calcul du taux d'efficacité est ensuite réalisé mois par mois. On compte le nombre de jours où le débit est supérieur au débit cible que l'on divise par le nombre de jours dans le mois.

L'impact de la régularisation est présenté en comparant le scénario de base Manantali seul au cas avec Manantali et Gourbassi combinés. De cette façon, l'impact net de Gourbassi peut plus facilement être isolé. Les résultats ont de plus été séparés en deux portions, la période de 1970 à 1987 (période d'hydraulicité « normale ») et la période de

1988 à 2009 (période sèche) afin de mieux distinguer l'impact du réservoir durant les années sèches.

Tableau 5-3 Taux d'efficacité de la régularisation pour Manantali et Gourbassi

Mois	Conditions naturelles à Bakel		Manantali seul		Manantali et Gourbassi	
	1970-1987	1988-2009	1970-1987	1988-2009	1970-1987	1988-2009
Janvier	0,31	0,54	0,55	0,63	0,64	0,72
Février	0,15	0,56	0,72	0,80	0,84	0,91
Mars	0,06	0,62	0,70	0,81	0,74	0,85
Avril	0,02	0,60	0,67	0,79	0,70	0,83
Mai	0,01	0,59	0,54	0,71	0,60	0,79
Juin	0,12	0,75	0,53	0,69	0,60	0,78
Juillet	0,98	1,00	0,87	0,98	0,82	0,94
Août	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Septembre	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Octobre	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Novembre	0,91	0,92	0,98	1,00	0,97	1,00
Décembre	0,53	0,63	0,68	0,78	0,75	0,84
Annuel	0,51	0,77	0,77	0,85	0,81	0,89

Tableau 5-4 Impact des aménagements sur le taux d'efficacité

Mois	Manantali		Gourbassi et Manantali		Gourbassi	
	1970-1987	1988-2009	1970-1987	1988-2009	1970-1987	1988-2009
Janvier	0,24	0,10	0,33	0,18	0,09	0,09
Février	0,57	0,24	0,68	0,35	0,11	0,11
Mars	0,64	0,18	0,68	0,22	0,04	0,04
Avril	0,65	0,20	0,68	0,23	0,03	0,03
Mai	0,53	0,12	0,59	0,19	0,06	0,07
Juin	0,41	-0,07	0,48	0,03	0,07	0,10
Juillet	-0,10	-0,02	-0,15	-0,06	-0,05	-0,04
Août	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Septembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Octobre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Novembre	0,07	0,08	0,07	0,08	0,00	0,00
Décembre	0,15	0,15	0,22	0,21	0,07	0,06
Annuel	0,26	0,08	0,30	0,12	0,04	0,04

Le Tableau 5-3 et le Tableau 5-4 démontrent l'impact important des aménagements. Manantali à lui seul permet d'augmenter le taux d'efficacité de 26% pour la période de 1970-1987 et de 8% pour la période 1988-2009. Gourbassi d'autre part fait augmenter le taux d'efficacité de 4% pour un total de 89% sur la période de 1988 à 2009 ce qui démontre son impact significatif sur la régularisation des débits. Il est important de mentionner que l'augmentation de l'efficacité de la régularisation est plus facilement atteinte pour les premiers pourcents alors que l'augmentation de l'efficacité de 85 à 89% demande beaucoup de ressources. Par exemple, porter le taux d'efficacité à 100% nécessiterait l'ajout d'un réservoir ayant une réserve utile très importante et notablement supérieure à celle projetée à Gourbassi afin de palier complètement aux fluctuations annuelles du régime hydrologique et d'assurer une réserve interannuelle offrant un débit minimal constant sur toute l'année.

Une autre méthode d'analyse des résultats consiste à utiliser une approche semblable à celle utilisée par Bader. Pour appliquer cette méthode, il s'agit de séparer d'un côté les débits forts et les débits faibles et de réaliser une analyse statistique de la récurrence des débits au-dessous ou au-dessus d'un certain seuil. Les résultats sont présentés pour 15, 30 et 60 jours de valeurs au-dessous ou au-dessus du seuil. Une distribution normale est utilisée afin de présenter les résultats avec en abscisse la valeur de la constante Z d'une distribution Normale. Les valeurs de Z positives représentent les années humides alors que les valeurs négatives sont les années sèches.

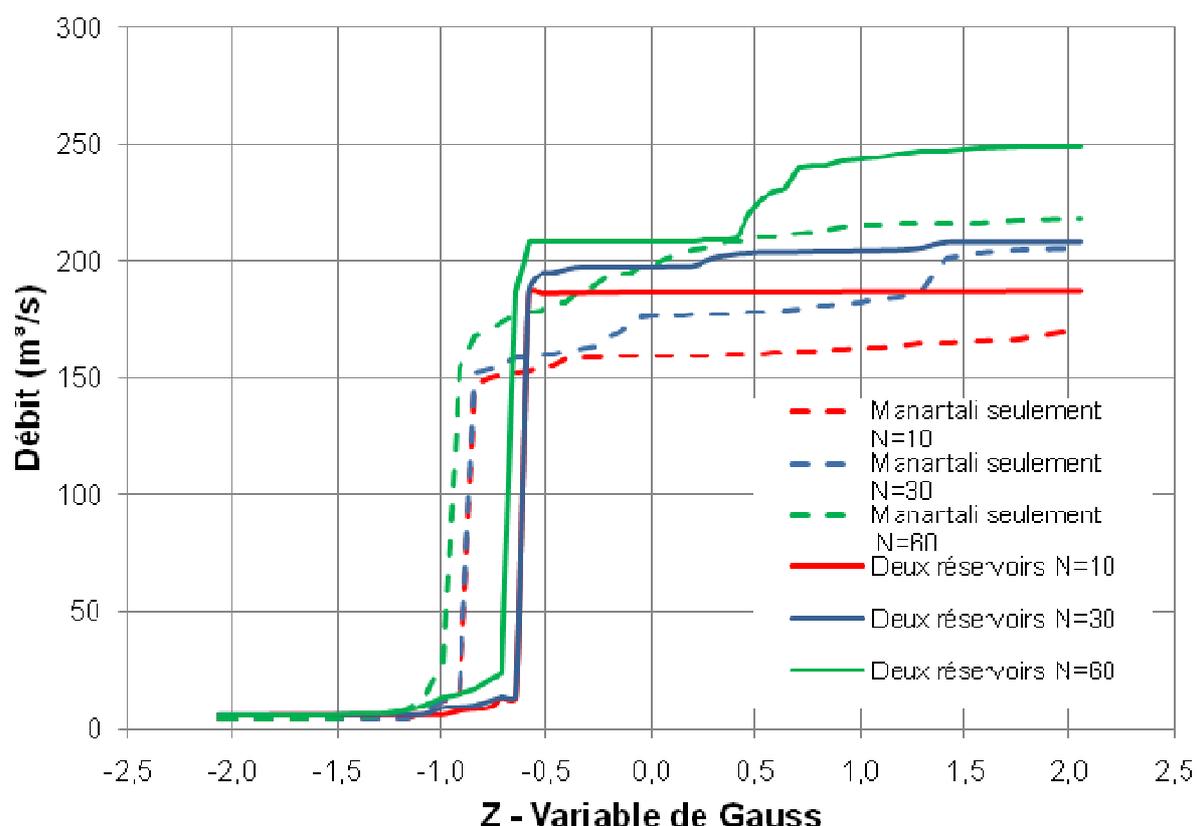


Figure 5-8 Débit non atteint pendant N jours à Bakel (faibles débits)

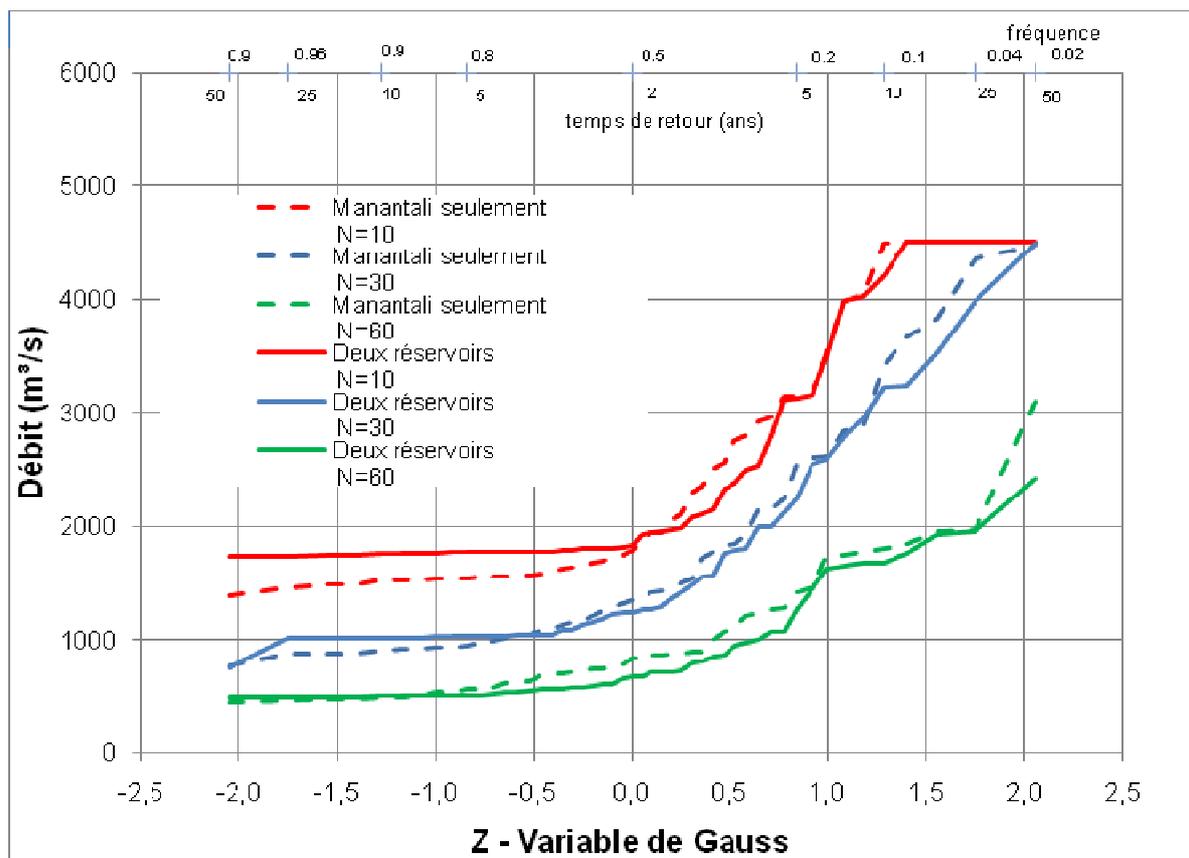


Figure 5-9 Débit dépassé pendant N jours à Bakel (forts débits)

La Figure 5-8 permet de constater l'augmentation importante du débit minimal à Bakel pour le cas où les deux retenues sont combinées. Pour le cas avec $Z = 0$, soit une probabilité de 50% le débit est supérieur pour toutes les durées au débit avec Manantali seul. L'augmentation du débit est de l'ordre de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ pour l'analyse sur 10 jours. Pour une valeur de Z comprise entre $-2,0$ et $-1,0$, soit une période de retour entre 7 ans (valeur Z de -1) et 50 ans ($Z = -2,5$), l'impact des deux réservoirs au lieu d'un seul n'est pas observé. Ceci est principalement dû au fait que lors de la succession de plusieurs années sèches, les deux réservoirs atteignent le niveau minimal et que seulement un débit très faible peut alors être restitué. Pour toutes les années humides, ayant une période de retour supérieure à 2 ans (valeur de $Z = 0,0$), le débit obtenu grâce aux deux retenues est toujours supérieur à la valeur de Manantali seul. D'autre part, il peut être constaté que les résultats de la gestion des deux réservoirs combinés sur une période de 60 jours présentent en général un impact total plus important que celui des durées plus courtes pour le débit restitué.

Cette analyse probabiliste permet d'évaluer l'impact de l'aménagement de Gourbassi sous un angle différent que l'analyse par le taux d'efficacité et d'apprécier son impact selon différents scénarios hydrologiques.

La Figure 5-9 permet de démontrer que la gestion de Gourbassi et Manantali combinés ne présente pas d'écarts importants au cas de Manantali seul en ce qui a trait au débit maximal évacué. En effet, l'utilisation de deux retenues permet d'augmenter la capacité de laminage des crues. Les cas pour lesquels le débit dépasse la limite de $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel sont inexistantes.

5.2 OPTIMISATION DU VOLUME DE LA RETENUE ET DE LA PUISSANCE INSTALLEE

5.2.1 Méthodologie

La simulation du volume de la retenue est effectuée en considérant les trois paramètres suivants : cote de gestion maximale (ou niveau maximal d'exploitation), valeur du marnage et puissance installée. L'analyse consiste à conserver deux des paramètres constants et à faire varier le troisième dans une gamme préalablement établie.

On fait varier le niveau maximal d'exploitation dans la gamme 88 m s.m. à 103 m s.m. (limite haute envisageable de la cote de gestion maximale compte tenu de la topographie du bassin) avec un intervalle de 1 m. On fait varier la hauteur du marnage entre 5 m et 15 m. À une puissance installée donnée (en MW) correspondra un débit nominal turbiné qui sera aussi fonction de la hauteur de chute nominale. Ainsi, pour les plages de niveau maximal d'exploitation et de marnage considérées, le débit nominal turbiné variera de 60 à 120 m³/s.

5.2.2 Résultats

Les résultats sont présentés aux tableaux et figures des pages suivantes qui montrent l'effet de chacun des trois paramètres pris séparément sur le débit moyen turbiné, le débit évacué et le productible annuel de Gourbassi (Tableau 5-5 et Figure 5-10 ; Tableau 5-6 et Figure 5-11 ; Tableau 5-7 et Figure 5-12).

Le cas de base est : cote de gestion maximale de 94 m s.m., marnage de 9 m et débit nominal de 90 m³/s.

Tableau 5-5 Effet de la cote de gestion maximale (marnage = 9 m et débit nominal = 90 m³/s)

CG _{Max} (m s.m.)	Débit turbiné (m ³ /s)	Déversement (m ³ /s)	Pertes (m ³ /s)	Total (m ³ /s)	Énergie annuelle moyenne produite (GWh)
88	34,0	54,1	3,6	91,8	46,4
89	34,8	52,9	4,1	91,8	49,7
90	35,5	51,6	4,7	91,8	53,1
91	36,4	50,2	5,3	91,8	56,8
92	37,3	48,6	5,9	91,8	60,8
93	38,2	47,1	6,5	91,8	64,8
94	39,0	45,8	7,1	91,8	68,7
95	39,6	44,4	7,8	91,9	72,5
96	40,3	43,0	8,6	91,9	76,4
97	40,8	41,7	9,4	91,9	80,1
98	41,4	40,3	10,2	91,9	84,0
99	41,9	39,0	11,0	91,9	87,9
100	42,3	37,7	11,9	91,9	91,6
101	42,4	36,6	12,9	91,9	94,8
102	42,3	35,8	13,9	92,0	97,4
103	41,9	35,1	15,0	92,0	99,4

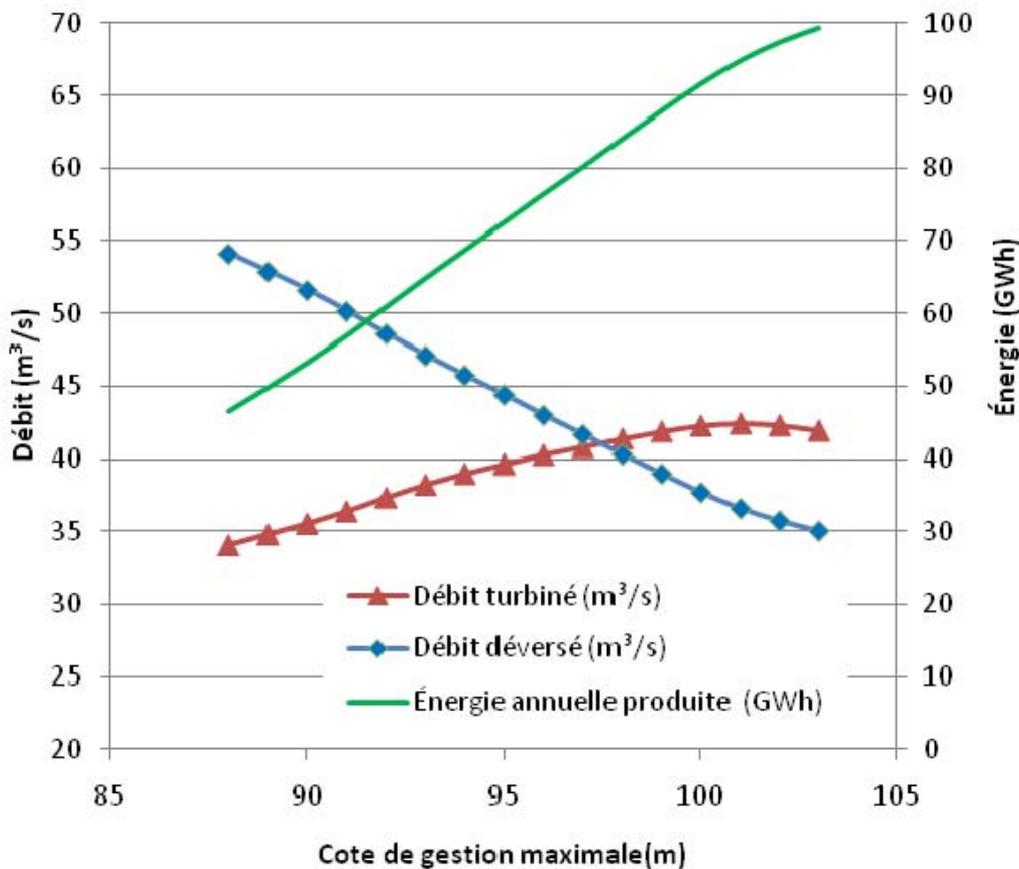


Figure 5-10 Effet de la cote de gestion maximale (marnage = 9 m et débit nominal = 90 m³/s)

Tableau 5-6 Effet du marnage ($CG_{\text{Max}} = 94 \text{ m s.m.}$ et débit nominal = $90 \text{ m}^3/\text{s}$)

Marnage (m)	CG_{min} (m s.m.)	Débit turbiné (m^3/s)	Déversement (m^3/s)	Pertes (m^3/s)	Total (m^3/s)	Énergie annuelle moyenne produite (GWh)
1	93	24,8	58,1	8,9	91,8	46,9
2	92	27,2	56,0	8,6	91,8	51,2
3	91	29,6	53,9	8,4	91,8	55,4
4	90	31,8	52,0	8,1	91,8	58,9
5	89	33,6	50,3	7,9	91,8	61,7
6	88	35,3	48,9	7,7	91,8	64,0
7	87	36,7	47,7	7,5	91,8	65,9
8	86	37,8	46,7	7,3	91,8	67,4
9	85	39,0	45,8	7,1	91,8	68,7
10	84	39,9	45,1	6,9	91,8	69,6
11	83	40,6	44,4	6,8	91,8	70,4
12	82	41,2	43,9	6,7	91,9	70,9
13	81	41,8	43,5	6,6	91,9	71,3

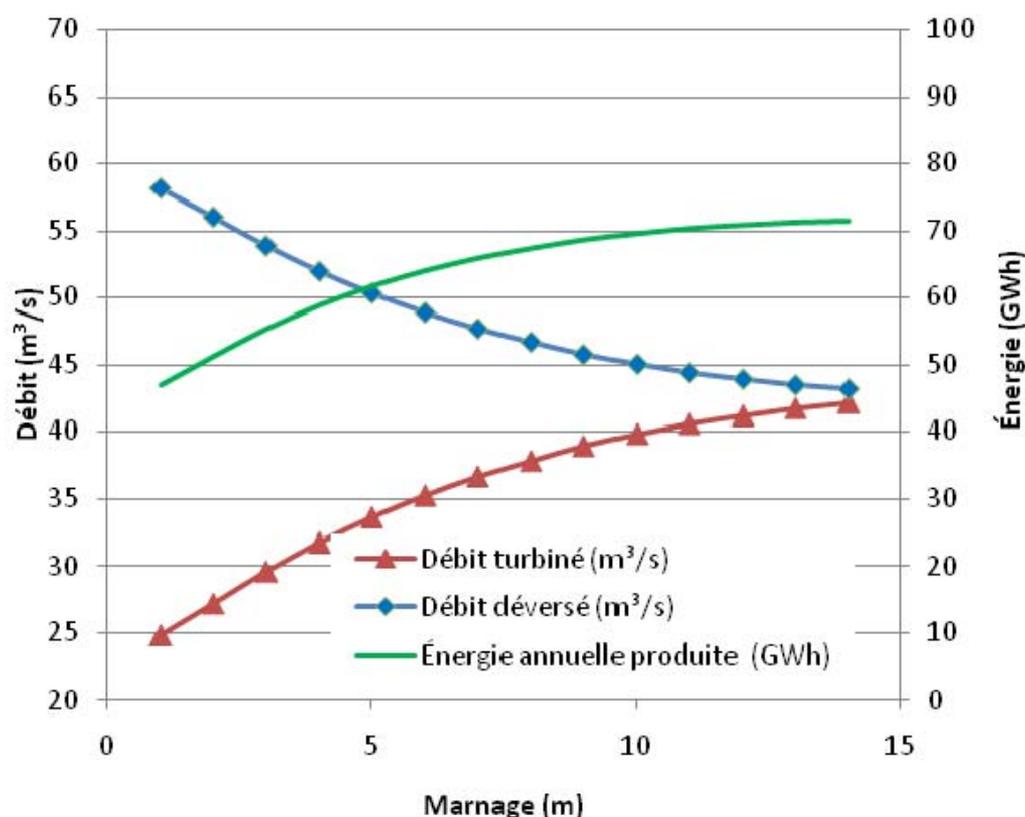


Figure 5-11 Effet du marnage (niveau minimal d'exploitation = 85 m s.m. et débit nominal = $90 \text{ m}^3/\text{s}$)

Tableau 5-7 Effet de la puissance installée (CG_{Max} = 94 m s.m. et marnage = 9 m)

Débit nominal (m ³ /s)	Débit turbiné (m ³ /s)	Déversement (m ³ /s)	Pertes (m ³ /s)	Total (m ³ /s)	Énergie annuelle moyenne produite (GWh)
60	33,9	50,9	7,1	91,8	59,6
65	34,8	49,9	7,1	91,8	61,2
70	35,7	49,0	7,1	91,8	62,8
75	36,6	48,2	7,1	91,8	64,4
80	37,4	47,4	7,1	91,8	65,8
85	38,2	46,6	7,1	91,8	67,3
90	39,0	45,8	7,1	91,8	68,7
95	39,8	45,0	7,1	91,8	70,1
100	40,5	44,2	7,1	91,8	71,4
105	41,3	43,5	7,1	91,8	72,7
110	42,0	42,8	7,1	91,8	74,0
115	42,7	42,1	7,1	91,8	75,3
120	43,4	41,4	7,1	91,8	76,6

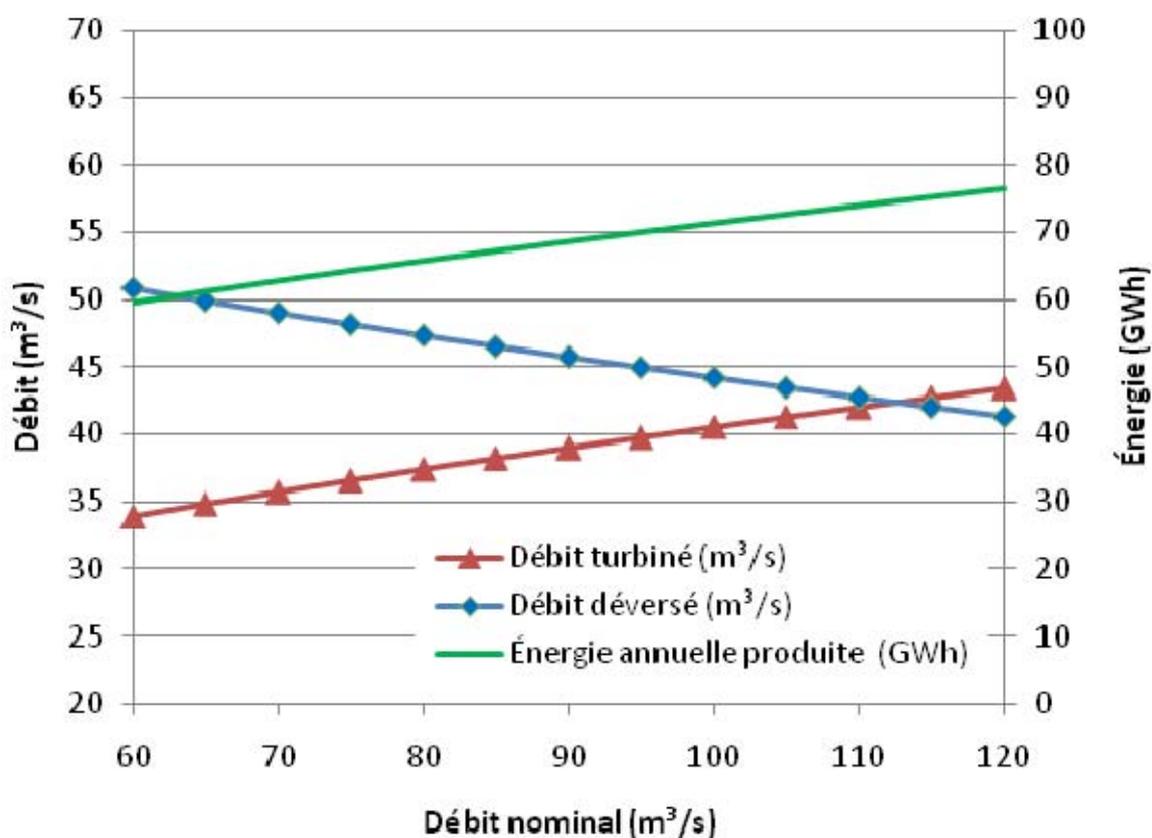


Figure 5-12 Effet de la puissance installée (C.R.N. = 94 m s.m. et marnage = 9 m)

5.2.3 Effets du changement climatique sur le productible

L'effet des changements climatiques indiqués plus haut dans ce rapport (§ 3.2) sur le productible ainsi que sur le débit moyen au site de Gourbassi et Manantali est présenté au Tableau 9. Pour ces calculs, la puissance installée à Gourbassi a été considérée comme étant de 21 MW et celle de Manantali de 200 MW. Ce tableau dresse également un résumé de la série de base et de la série sèche pour Gourbassi. En comparant la série future moyenne à la série de base, il peut être constaté que l'impact est nul pour l'aménagement de Gourbassi. Pour Manantali l'impact représente une augmentation de la production de 1,4 % de la production. L'effet sur le productible combiné des deux centrales est une augmentation de 1,2%, avec une projection basse représentant une diminution de 15 % et une projection haute ayant une augmentation de 11 % du productible.

Tableau 5-8 Impact des changements climatiques sur le productible annuel

Série	Manantali			Gourbassi			Productible annuel combiné (GWh)
	Q _{turbiné} (m ³ /s)	Q _{évacué} (m ³ /s)	Productible annuel (GWh)	Q _{turbiné} (m ³ /s)	Q _{évacué} (m ³ /s)	Productible annuel (GWh)	
Série de base (1961-2009)	188	63	653	39	46	69	722
Série sèche (1980-2009)	178	45	601	36	28	62	664
Série Future - Basse	170	47	554	36	31	62	616
Série Future - Moyenne	189	66	662	39	47	69	731
Série Future - Haute	203	86	727	42	62	75	801

5.2.4 Conclusion

Les résultats précédents permettent de constater que la cote de gestion maximale, le marnage et le débit nominal ont un impact significatif sur le productible annuel. Chacun de ces paramètres doit donc être optimisé par une analyse coûts-bénéfices.

En ce qui a trait à la cote de gestion maximale, il est important de réaliser que son augmentation conduit à une augmentation du coût des ouvrages de génie civil (prise d'eau, évacuateur et barrage). Les résultats présentés à la Figure 5-10 permettent de constater que l'énergie annuelle produite passe de 50 GWh à près de 100 GWh lorsque la cote de gestion maximale passe de 88 à 103 m s.m. Il s'agit d'une augmentation significative. De plus, il peut être observé que la courbe d'énergie annuelle présente une légère inflexion pour une valeur voisine de 100 m s.m. ce qui pourrait indiquer que l'optimum économique pourrait se situer autour de cette valeur. Les considérations environnementales et sociales liées à la cote de gestion maximale feront l'objet d'une analyse plus détaillée lors de la suite de l'étude afin d'assurer que tous les impacts du projet sont pris en compte dans la phase d'optimisation.

Concernant le marnage, son augmentation conduit à une augmentation du productible jusqu'à l'atteinte d'un plateau pour un marnage de 10 m. Selon les résultats présentés à la Figure 5-11, un marnage supérieur à 10 ne permet pas d'obtenir un gain de production substantiel. Pour le cas qui a été étudié dans ce rapport (cote de gestion maximale de 94 m s.m. et débit nominal de 90 m³/s), le productible atteint une asymptote à une valeur de 70 GWh/an. Un marnage élevé (de l'ordre de 10 m) pourrait favoriser les cultures sur le pourtour du réservoir en permettant une culture similaire à

celle des cultures de décrues. Il est important de noter que plus le marnage est élevé, plus la prise d'eau est coûteuse puisque celle-ci d'eau doit être calée suffisamment bas pour éliminer les problèmes de vortex.

En ce qui concerne la puissance installée (représentée dans ce rapport par le débit nominal turbiné), l'analyse permet de constater (Figure 5-12) une augmentation linéaire du productible pour un débit nominal variant entre 60 et 120 m³/s. Pour cette gamme de débits, le productible varie entre 60 et 75 GWh ce qui est une bande relativement étroite lorsque comparée à l'effet des deux autres paramètres étudiés.

Lors de l'étape suivante de l'étude, on fixera le débit nominal final. Le fait de choisir une puissance installée élevée est normalement avantageux dans les cas où l'énergie électrique peut être vendue en période de pointe pour une valeur plus élevée qu'en période de base. Toutefois dans le cas de Goubassi une telle distinction dans le prix de l'énergie n'est sans doute pas pertinente ce qui tendrait à favoriser une puissance installée légèrement plus faible.

Il est également bon de noter que la puissance installée est également liée au débit module du site. Dans les simulations énergétiques, la période de simulation est de 1961 à 2009 et le débit module entrant au réservoir est de 91,8 m³/s.

La comparaison des différentes variantes sur le plan économique et socio-écologique qui sera l'objet de la prochaine étape de l'étude permettra d'optimiser la cote de gestion maximale, la hauteur de marnage et la capacité installée afin de déterminer les caractéristiques principales du projet devant faire l'objet de l'APS.

CHAPITRE 6

Documents de référence

6. DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- Réf. 1 **Annales de Géographie N° 367. LXVIII^e année**, *Aspects de l'évolution morphologique récente de l'Ouest Africain*, Mai-Juin 1959
- Réf. 2 **BADER JEAN-CLAUDE**, *LE SOUTIEN DE CRUE MOBILE DANS LE FLEUVE SÉNÉGAL À PARTIR DU BARRAGE DE MANANTALI*, *Journal des Sciences Hydrologiques*, Décembre 1997
- Réf. 3 **Bruk, S.**, *Méthodes de calcul de la sédimentation dans les lacs et les réservoirs*, Unesco, 1986
- Réf. 4 **Dames & Moore – USAID**, *OMVS - République du Sénégal. Étude du Plan Directeur du Développement de la Haute Vallée du Fleuve Sénégal. Résumé Analytique*, 1992.
- Réf. 5 **Dames & Moore – USAID**, *OMVS - République du Sénégal. Étude du Plan Directeur du Développement de la Haute Vallée du Fleuve Sénégal. Rapport Final Volume I – Rapport de Synthèse*, 1992.
- Réf. 6 **Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. - FAO**, *Les besoins en eau des cultures*, in: *Bulletin d'irrigation et de drainage n°24*, 1976
- Réf. 7 **Gac Jean-Yves, Appay Jean-Luc, Carn Michel, Orange Didier**, *Le haut bassin versant du fleuve Sénégal*, 1990
- Réf. 8 **GRET**, *La rizière et la valise. Irrigation, migration et stratégies paysannes dans la vallée du fleuve Sénégal*, 1991
- Réf. 9 **INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION – ORSTOM**, *PLAN DIRECTEUR DE LA HAUTE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL, CLIMATOLOGIE – HYDROLOGIE*, *Rapport final*, 1991
- Réf. 10 **IRD**, *PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS, PHASE III, CRUE ARTIFICIELLE ET CULTURES DE DECRUE, SYNTHÈSE FINALE*, Décembre 2001
- Réf. 11 **Louis Berger Intl. - SAED**, *Périmètres irrigués villageois de Bakel*, 1980
- Réf. 12 **Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao**, *Global Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007
- Réf. 13 **OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER (ORSTOM)**, *LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL*, Paris, 1974
- Réf. 14 **Organisation Météorologique Mondiale**, *Manuel pour l'estimation de la pluie maximum probable (PMP)*, Vol no. 1045, 2009

- Réf. 15 **ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SÉNÉGAL (OMVS) TCP/RAF/3210, PLAN D'ACTION RÉGIONAL POUR L'AMÉLIORATION DES CULTURES IRRIGUÉES DANS LE BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL. ACTUALISATION DOCUMENT PROVISOIRE**, Novembre 2009
- Réf. 16 **ORSTOM – BADER JEAN-CLAUDE, ÉTUDE DE L'IMPACT DU BARRAGE DE MANANTALI SUR LE RÉGIME HYDROLOGIQUE DU SÉNÉGAL AU NIVEAU DE BAKEL**, Octobre 1992
- Réf. 17 **REPUBLIQUE DU MALI – Commissariat à la Sécurité Alimentaire (CSA) – Projet de Mobilisation des Initiatives en matière de Sécurité Alimentaire au Mali (PROMISAM), PLAN DE SECURITE ALIMENTAIRE DU CERCLE DE KAYES 2007- 2011**, Avril 2007
- Réf. 18 **REPUBLIQUE DU MALI – Commissariat à la Sécurité Alimentaire (CSA) – Projet de Mobilisation des Initiatives en matière de Sécurité Alimentaire au Mali (PROMISAM), SYNTHÈSE DES PLANS DE SECURITE ALIMENTAIRE DES COMMUNES DU CERCLE DE KENIEBA. 2007- 2011**, Avril 2007
- Réf. 19 **REPUBLIQUE DU MALI – MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE – Direction Nationale du Génie Rural – AECID, Schéma Directeur d'Irrigation de la Région de Kayes (Mali) – PROJET PASNDI**, Avril 2010
- Réf. 20 **République du Sénégal – Ministère de l'Économie, des Finances et du Plan, Plan directeur de développement intégré de la Rive Gauche du Fleuve Sénégal (PDRG): document de synthèse. Annexes 1 à 3 (Ressources naturelles et humaines)**, 1994
- Réf. 21 **SAED - Projet AGRHYMET, Détermination des Besoins en Eau. Zone de la Vallée du Fleuve Sénégal. Bulletin Technique N° 7**, Juillet 1993
- Réf. 22 **SCET TUNISIE & Bceom Société Française d'Ingénierie, Étude de faisabilité et d'avant-projet sommaire d'un système de navigation mixte mer – fleuve Sénégal, RAPPORT FINAL**, Décembre 2004
- Réf. 23 **SENEGAL-CONSULT SUISSE, ETUDE DE PREINVESTISSEMENT POUR LA REGULARISATION DU FLEUVE SENEGAL, PROJET D'UN SYSTEME DE CONTROLE DES DEBITS DANS LE BASSIN DU HAUT SENEGAL, VOLUME 1.A, RAPPORT GENERAL**, 1970
- Réf. 24 **SENEGAL-CONSULT SUISSE, ETUDE DE PREINVESTISSEMENT POUR LA REGULARISATION DU FLEUVE SENEGAL, PROJET D'UN SYSTEME DE CONTROLE DES DEBITS DANS LE BASSIN DU HAUT SENEGAL, VOLUME 2, TOPOGRAPHIE**, 1970
- Réf. 25 **SENEGAL-CONSULT SUISSE, ETUDE DE PREINVESTISSEMENT POUR LA REGULARISATION DU FLEUVE SENEGAL, PROJET D'UN SYSTEME DE CONTROLE DES DEBITS DANS LE BASSIN DU HAUT SENEGAL, VOLUME 5, ETUDE DE REGULARISATION ET DE PRODUCTION D'ENERGIE**, 1970

- Réf. 26 **SENEGAL-CONSULT SUISSE**, *ETUDE DE PREINVESTISSEMENT POUR LA REGULARISATION DU FLEUVE SENEGAL, PROJET D'UN SYSTEME DE CONTROLE DES DEBITS DANS LE BASSIN DU HAUT SENEGAL, VOLUME 7, AMENAGEMENTS DE GOURBASSI, MANANTALI ET BOUREYA*, 1970
- Réf. 27 **SNC-LAVALIN/DESSAU/HYDROCONSULT**, *PROGRAMME DE REVITALISATION DES VALLEES FOSSILES – ÉTUDE HYDROLOGIQUE POUR LA DETERMINATION DES DISPONIBILITE EN EAU DU FLEUVE SENEGAL*, 1998
- Réf. 28 **SNC-Lavalin International Inc.**, *ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET D'AVANT-PROJET SOMMAIRE (APS) DE L'AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE DE GOURBASSI – Rapport de lancement et d'orientation (Version finale)*, Octobre 2010
- Réf. 29 **Strand, R. I. & Pemberton, E., L.** – **US Bureau of Reclamation**, *Reservoir sedimentation Technical Guideline for Bureau of Reclamation*, October 1982
- Réf. 30 **Zeller, Groupe de recherche et de Réalisations pour le Développement Rural dans le tiers monde G.R.D.R.**, Monographie prospective du Département de Bakel. Chapitre 1, 1994

ANNEXE A

Cartes et dessins

LISTE DES PLANS ET DESSINS JOINTS EN ANNEXE

No. de PLANCHE <i>PLATE Nr.</i>	TITRE <i>TITLE</i>	No. de DESSIN <i>DRAWING Nr.</i>	REV.
Go1	PLAN DE SITUATION <i>LOCATION PLAN</i>	020857-EGTO-40DD-0001	00
Go5	CARTE DES BASSINS VERSANTS ET DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE <i>CATCHMENTS AND HYDROLOGICAL MAP</i>	020857-ENVI-4EDD-0002	00
Go13	LOCALISATION DES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS <i>IRRIGATED PERIMETER LOCATION</i>	020857-ENVI-4EDD-0003	00

ANNEXE B

Méthodologie et résultats des calculs des besoins en eau pour l'agriculture

RAPPEL DES ÉQUATIONS RÉGISSANT LE CALCUL DES BESOINS EN EAU

$$I_{\text{net}} = (ET_{\text{culture}} + P_{\text{perc}}) - (P_{\text{efficace}} + S)$$

I_{net} = Irrigation nette

ET_{culture} = Évapotranspiration

P_{perc} = Pertes par percolation; également l'eau nécessaire pour l'imbibition des semences.

P_{efficace} = Précipitation efficace

S = Quantité d'eau stockée dans le sol et remontées capillaires

ET_{culture}

L'évapotranspiration de la culture ET_{culture} aussi dénotée (Et_c) est calculée en multipliant l'évapotranspiration de référence (ET_0) avec un coefficient cultural (K_c).

$$ET_{\text{culture}} \quad Et_c = K_c * ET_0$$

ET_0 = Évapotranspiration de référence. L'évapotranspiration de référence est l'évapotranspiration d'un couvert de référence, bien alimenté en eau. Le couvert de référence est exempt de maladie, cultivé dans des champs de large superficie, dans des conditions de sol optimales, possédant un rendement maximal dans les conditions climatiques existantes.

Elle permet d'éviter de définir une évapotranspiration pour chaque culture, chaque état phénologique, chaque état de stress. Le couvert de référence correspond à un gazon homogène en phase active de croissance, bien alimenté en eau et couvrant totalement le sol. L'évapotranspiration de référence rassemble en fait tous les contrôles climatiques de l'évapotranspiration; c'est un paramètre climatique.

L'évapotranspiration de référence, ET_0 , est calculée à l'aide de la formule de Penman en utilisant les moyennes mensuelles de la température minimale et maximale, de l'humidité relative minimale et maximale, de l'insolation relative et de la vitesse du vent. Les coefficients proposés par Doorenbos et Pruitt³⁰ sont utilisés.

Pour le calcul de l'évapotranspiration de référence ET_0 les données climatiques suivantes sont requises :

- La température moyenne mensuelle ;
- La moyenne mensuelle des températures maximales journalières ;
- La moyenne mensuelle des températures minimales journalières ;
- La vitesse du vent, l'ensoleillement, la radiation nette et l'humidité relative.

³⁰ Doorenbos, J. and Pruitt, W. O, *Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, Italy. 1977*

K_c = Coefficient cultural. Le coefficient cultural K_c varie en fonction du stade de développement, du climat et de la culture. La longueur du cycle de végétation varie en fonction de la culture, de la saison et de la date de semis.

Tableau B-1 Date de semis et longueur du cycle

Spéculation	Date de semis	Longueur de cycle
Maïs	Dernière décade de juin	95 jours
Maïs	Dernière décade de novembre	120 jours
Tomate	Dernière décade de décembre	120 jours
Maraîchage	Dernière décade de décembre	100 jours

Le cycle est décomposé en quatre phases distinctes de développement : (i) phase initiale, (ii) phase de développement, (iii) mi-saison et (iv) fin de saison. La durée de chaque stade de développement et les valeurs de K_c des différentes spéculations sont présentées dans la figure suivante.

Stade	Hivernage Maïs		Contre saison froide					
	n	kc	Maïs	Tomates	Maraîchères			
	n	kc	n	kc	n	kc		
i	20	0.50	20	0.50	10	0.50	20	0.40
ii	30	0.5-1.2	40	0.5-1.2	30	0.50-1.25	30	0.4-1.2
iii	35	1.20	50	1.20	40	1.25	30	1.20
iv	10	1.2-0.6	10	1.2-0.6	40	1.25-0.65	20	1.2-0.8

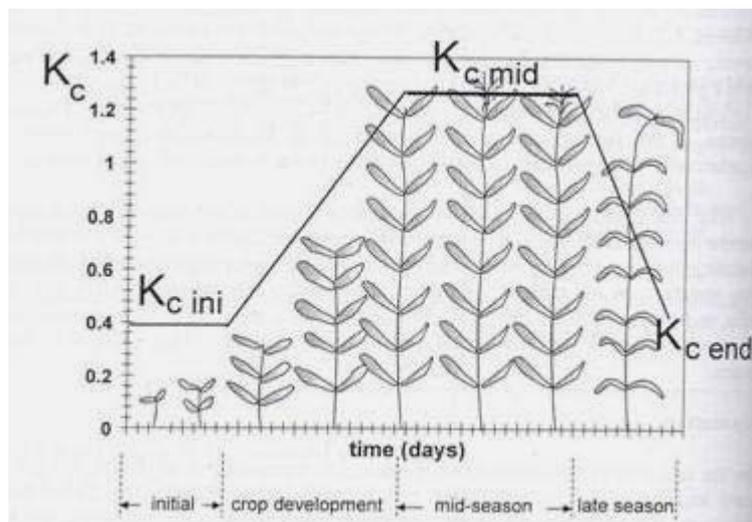


Figure B-1 La durée en jours(n) et les valeurs de Kc

Les données caractérisant le sol :

- Capacité de rétention en eau
- Déficit hydrique initial *soil moisture depletion* = 0%

- Teneur en eau initiale
Au début du cycle, une pré-irrigation sera nécessaire pour amener la zone racinaire à une humidité favorable. Avec les types de sols de la région, une pré-irrigation de 25 mm est juste en début de cycle. Cette pré-irrigation permet d'atteindre la réserve facilement utilisable sur les 20 premiers centimètres du sol. Ensuite il faudra procéder à des irrigations complémentaires au fur et à mesure que les racines se développent.
- Taux maximum d'infiltration
- Profondeur de la couche limitant le développement racinaire

LE CAS PARTICULIER DU RIZ

Dans le cas particulier du riz les besoins nets en eau d'irrigation d'une saison sont exprimés par :

$$I_{\text{net}} = I_{\text{mb}} + \text{Lame} + \text{ET}_{\text{riz}} + \text{S}_{\text{Perc}} - \text{P}_{\text{efficace}}$$

I_{mb} = La quantité d'eau nécessaire pour saturer le sol des rizières avant la mise en place de la culture. • L'imbibition est fonction du type de sol et de l'état initial d'humidité du sol. Suite aux expérimentations effectuées dans quelques cuvettes (Raes et Sy, 1993), l'imbibition est évaluée à 175 mm soit 1,750 m³/ha. La valeur est légèrement sur estimée pour compenser le surplus en percolation observé en phase d'imbibition.

Un semis direct à l'aide de graines pré-germées est de coutume. Avant le semis, une lame d'eau d'environ 5 cm est généralement apportée pour éviter tout stress hydrique. Après le semis, cette lame est évacuée (ou laissée évaporer) pour faciliter la levée et l'enracinement des plantules. Après quelques jours, la lame est progressivement restaurée jusqu'à une hauteur d'environ 7 à 10 cm. Dix jours avant la fin présumée du cycle végétatif du riz les champs sont progressivement vidés.

Pour les besoins en eau d'irrigation, les calculs sont établis pour une hauteur de lame de 150 mm, soit 1,500m³/ha.

Lame = La quantité d'eau nécessaire à l'établissement d'une submersion de la parcelle.

ET_{riz} = La quantité d'eau perdue par évapotranspiration potentielle du riz.

L'évapotranspiration du riz (ET_{riz}) est calculée pour une riziculture hivernale et une riziculture de contre-saison.

L'ET_{riz} est calculée en multipliant l'ET_o avec un coefficient cultural dont la valeur est fonction du stade de développement. Les coefficients culturaux ont été choisis selon les recommandations de la FAO. Une valeur de 1,15 a été sélectionnée pour le stade de végétation. En hivernage, ce premier stade aura une longueur de deux mois, tandis qu'en contre-saison il sera plutôt de deux à trois mois et ceci en fonction de la date de semis et de la variété. En mis-saison

(floraison et formation du produit), le coefficient atteint la valeur de 1,30, pour ensuite descendre à 1,05 à un mois de la récolte. Toutes les irrigations seront arrêtées 10 jours avant la fin présumée du cycle.

Deux niveaux de percolation ont été retenus : 3,5 et 5 mm/jour.

Les 3,5 mm/jour est la percolation moyenne des faux-holladés, situés entre les berges de la rivière et les cuvettes de décantation. Les petits périmètres privés sont parfois aménagés tous près de la rivière sur les berges. La percolation y peut facilement atteindre 5 mm/jour. Au début de la saison les valeurs des percolations retenues seront souvent plus grandes, mais une ou deux décades après la mise en eau la percolation se stabilisera aux niveaux retenus.

S_{Perc} = La quantité d'eau perdue par drainage profond dans les rizières.

$P_{efficace}$ = la quantité de pluie effectivement stockée dans les rizières.

ASPECTS PYTHOTECHNIQUES DE LA CULTURE DE L'ARACHIDE

L'arachide (*Arachis hypogea* L.) cultivée est une légumineuse annuelle de 30 à 70 centimètres de haut, érigée ou rampante (Figure B-2). La partie aérienne est portée par une tige principale, toujours érigée, et deux ramifications latérales primaires issues du collet de la plante. La base de l'ovaire fécondé s'allonge pour former un pédoncule appelé gynophore qui s'enfonce dans le sol où se forme le fruit (gousse) composé d'une coque indéhiscente contenant de 1 à 4 graines. Le système racinaire pivotant permet d'explorer un volume de sol important. Il porte des nodosités fixatrices d'azote atmosphérique, caractéristiques des légumineuses, qui permettent à la plante d'enrichir le sol en azote lorsque les conditions sont par ailleurs satisfaisantes.

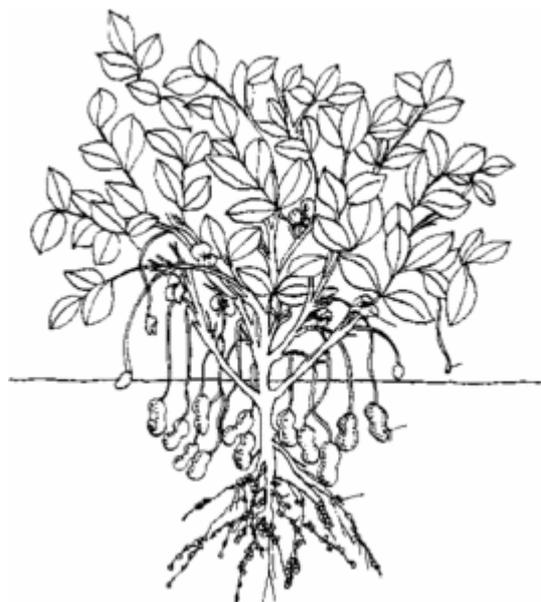


Figure B-2 Plant d'arachide³¹

³¹ Source : <http://agora.qc.ca>

Au Sénégal, la culture de l'arachide s'étale sur les mois de juin à novembre-décembre compte tenu de la variabilité spatio-temporelle au niveau de la pluviométrie. L'arachide n'est pas irriguée dans la région et ne fait donc pas partie des assolements retenus. En période de stress hydrique l'irrigation d'appoint peut conduire souvent à une amélioration substantielle (y compris qualitative) au prix d'un investissement minime.

Régime hydrique

L'arachide présente des stades de sensibilité variables à la sécheresse : les besoins en eau sont élevés au moment de l'imbibition de la graine, qui une fois la germination amorcée craindra l'excès d'eau. La période de floraison-formation des gousses (30-70 jours après semis) correspond à une phase de sensibilité à la sécheresse, alors que la phase finale de maturation sera favorisée par une sécheresse relative, des pluies à ce stade pouvant en outre provoquer des germinations sur pied chez les variétés non dormantes. Une pluviométrie comprise entre 500 et 1 000 mm pendant la saison de culture permet généralement d'obtenir une bonne récolte, mais la bonne répartition des pluies en fonction du cycle de la variété est plus importante que le total pluviométrique. Selon SCHILLING (1997) des rendements supérieurs à 1 tonne/ha en grande culture ont été obtenus au nord du Sénégal, sous 350 mm de pluies concentrées sur trois mois, avec la variété hâtive tolérante à la sécheresse 55-437.

BESOINS BRUTS EN EAU D'IRRIGATION

Les besoins bruts en eau d'irrigation sont obtenus en majorant les besoins nets avec les volumes d'eau nécessaires pour le contrôle de la salinité et en tenant compte de l'efficacité de distribution.

L'efficacité de distribution dépend du design et du mode de gestion des périmètres. Vu que les canaux sont relativement imperméables, et que beaucoup de pertes de distribution à l'intérieur du périmètre sont en effet des irrigations, une valeur de 85 pour cent a été retenue comme efficacité.

Un contrôle de salinité s'impose à cause d'apport des sels par l'eau d'irrigation. Dans la vallée, le premier assèchement et la percolation de l'eau à travers la zone racinaire tout le long de la saison sont en général suffisants pour évacuer les sels en dehors de la zone racinaire.

Détermination de l'efficacité d'un réseau d'irrigation par Roelofsen (FAO) :

1) Données de base

- périmètre de 50 ha (exemple)
- système de rotation d'irrigation de 5 ha/jour
- superficie par paysan : 2 ha
- débit de la pompe $Q = 8\,000\text{ m}^3/\text{jour}$
- canaux trapézoïdaux
- infiltration : $0,1\text{ m}^3/\text{m}^2$
- évaporation : 10 mm/jour (E bac)
- sol : limon argileux imperméable

2) Pertes par infiltration et évaporation

a. Canal principal

Le canal est rempli de manière permanente

- longueur totale : 1500 m
- grande base B = 2,90 m
- petite base b = 0,50 m
- côté 1 = 1,45 m

$$\text{infiltration : } 3,4 \times 1500 \times 0,1 = 510 \text{ m}^3/24 \text{ h}$$

$$\text{évaporation : } 2,9 \times 1500 \times 0,01 = \frac{43 \text{ m}^3/24 \text{ h}}{553 \text{ m}^3/24 \text{ h}}$$

soit 7% de Q

b. Canal secondaire

- longueur totale : 5000 m soit 500 m/5 ha

$$B = 1,80 \text{ m}$$

$$b = 0,30 \text{ m}$$

$$1 = 0,90 \text{ m}$$

$$\text{infiltration : } 2,1 \times 5000 \times 0,1 = 1050 \text{ m}^3/24 \text{ h/50 ha}$$

soit 1050 m³/10 jours/5 ha

$$\text{évaporation : } 1,8 \times 5000 \times 0,01 = 90 \text{ m}^3/24 \text{ h/50 ha}$$

soit 90 m³/10 jours/5 ha

$$\text{Pertes : } 1140 \text{ m}^3/24 \text{ h soit } 14\% \text{ de Q}$$

Les pertes dans les canaux principaux et secondaires s'élèvent à 1693 m³/24 h soit une efficacité de distribution de 79%.

On peut améliorer la situation en creusant des canaux tertiaires à raison de 3 canaux de 80 m de longueur par 2 ha. Cela permettrait un gain de 37% en efficacité de distribution mais il se produirait également des pertes par infiltration et évaporation dans les canaux tertiaires.

c. Canal tertiaire

25 unités de 2 ha

$$\text{longueur des canaux : } 25 \times 3 \times 80 = 6000 \text{ m}$$

$$B = 0,90 \text{ m}$$

$$b = 0,30 \text{ m}$$

$$1 = 0,42 \text{ m}$$

$$\text{infiltration : } 1,15 \times 6000 \times 0,1 = 690 \text{ m}^3/24 \text{ h/50 ha}$$

soit 690 m³/10 jours/5 ha

$$\text{évaporation : } 0,9 \times 6000 \times 0,01 = 54 \text{ m}^3/24 \text{ h/50 ha}$$

soit 54 m³/10 jours/5 ha

Les pertes totales dans les canaux primaires, secondaires et tertiaires sont de 2487 m³/jour; compte tenu de la capacité de la pompe qui est de 8000 m³/jour, on a une efficacité de 70%.

L'efficience totale, donnant le rapport entre le volume d'eau d'irrigation utilisée par la culture et le volume total d'eau d'irrigation, est de l'ordre de 55 pour cent pour une riziculture sur des sols peu perméables, et de 50 à 45 pour cent sur des sols perméables à très perméables.

CULTURES IRRIGUÉES HIVERNAGE													
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	RIZ	Polycole	Riz	Sorgho	Mais	Latitude	Longitude	Evapotranspiration	Pluie
DRAKayes	1	Gouthioubé	Mali	150	s/d	s/d	60	60	30	14.7571	-12.2297	Bakel	Bakel Quin Sèche
DRAKayes	2	Sangalou	Mali	60	s/d	s/d	24	24	12	14.7200	-12.2081		
DRAKayes	3	Féqui	Mali	60	s/d	s/d	24	24	12	14.6212	-12.1483		
DNA	4	Moussala	Mali	1800	s/d	s/d	720	720	360	13.6863	-12.0486	KENIEBA	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée
DNA	5	Kéniékéniéba	Mali	30	s/d	s/d	12	12	6	13.3748	-11.8652		
DNA	6	Gorbou	Mali	50	s/d	s/d	20	20	10	12.8328	-11.3867		
TOTAL				2150			860	860	430				
FICHIERS CULTURE							RIZ direct Hiv 118j Jul.	SORGHO Hiv 125j 1Jul	MAIZ Hiv 95j 21Jun				
FICHIERS SOLS							Fondé SOI	Fondé SOI	Fondé SOI				
							Given	2/3 of Polycole	1/3 of Polycole	Fichier Climat et Précip.			
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	RIZ	Polycole	Riz	Sorgho	Mais	Latitude	Longitude	Evapotranspiration	Pluie
S.A.E.D-Bakel	1	Sébou	Sénégal	200	50	150	50	100	50	14.6851	-12.1765	Bakel	Bakel Quin Sèche
	2	Sintiou Déboukoulé	Sénégal	100	20	80	20	53	27	14.6364	-12.1515		
	3	Djimbé	Sénégal	75	10	65	10	43	22	14.6194	-12.1665		
	4	Dialiguel	Sénégal	150	30	120	30	80	40	14.5616	-12.2032	Kidira	Kidira Quin Sèche
	5	Sinthou Dialigal	Sénégal	100	20	80	20	53	27	14.5436	-12.2220		
	6	Houro Imadou	Sénégal	100	20	80	20	53	27	14.5158	-12.2210		
	7	Séling	Sénégal	125	20	105	20	70	35	14.4964	-12.2254		
	8	Kidira	Sénégal	75	15	60	15	40	20	14.4574	-12.2173		
	9	Alahina	Sénégal	70	5	65	5	43	22	14.4332	-12.1994		
	10	Nayé	Sénégal	125	15	110	15	73	37	14.4197	-12.2081		
	11	Djita	Sénégal	100	10	90	10	60	30	14.3763	-12.2255		
	12	Doundé	Sénégal	150	10	140	10	93	47	14.2986	-12.2372	Kenieba	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée
	13	Débou Diaoubé	Sénégal	200	50	150	50	100	50	14.2975	-12.2242		
	14	Bountou	Sénégal	150	20	130	20	87	43	14.2420	-12.2288		
	15	Hamdallaye	Sénégal	100	70	30	70	20	10	14.2072	-12.2247		
	16	Fanira	Sénégal	100	60	40	60	27	13	14.1788	-12.2230		
	17	Takoutala	Sénégal	125	80	45	80	30	15	14.1545	-12.2396		
	18	Sitabanta	Sénégal	30	0	30	0	20	10	14.1089	-12.2040		
	19	Lalli	Sénégal	30	0	30	0	20	10	14.1133	-12.1926		
	20	Madina Tiacol	Sénégal	40	10	30	10	20	10	14.0441	-12.1899		
	21	Sambayayé- Sekond	Sénégal	30	10	20	10	13	7	14.0064	-12.1945		
	22	Tomboura	Sénégal	50	15	35	15	23	12	13.9676	-12.2169	Kidira	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée
	23	Sansanding	Sénégal	30	10	20	10	13	7	13.9309	-12.2137		
	24	Kaourou	Sénégal	30	10	20	10	13	7	13.6221	-12.0412		
	25	Laminéa	Sénégal	40	15	25	15	17	8	13.6089	-12.0253		
	26	Soréto Saousiré	Sénégal	20	0	20	0	13	7	13.4927	-11.9091		
	27	Diabougou	Sénégal	20	0	20	0	13	7	13.4320	-11.8766		
	28	Sonkounkou	Sénégal	20	0	20	0	13	7	13.3863	-11.8909		
TOTAL				2385	575	1810	575	1207	603				
FICHIERS CULTURE							RIZ direct Hiv 118j Jul.	SORGHO Hiv 125j 1Jul	MAIZ Hiv 95j 21Jun				
FICHIERS SOLS							Fondé SOI	Fondé SOI	Fondé SOI				

Figure B-3 Les superficies potentielles de cultures irriguées retenues pour l'hivernage

CULTURES IRRIGUÉES Contre Saison Froide = 20% superficie Cultures Irriguées en HIVERNAGE										Fichier Climat et Précip.		
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	Sorgho 10%	Mais 70%	Maraichage 20%	TOTAL 100%	Latitude	Longitude	Evapotranspiration	Pluie
DRAKayes	1	Gouthioubé	Mali	30	3	21	6	30	14.7671	-12.2297		
DRAKayes	2	Sangalou	Mali	12	1	8	2	12	14.7200	-12.2081	Bakel	Bakel Quin Sèche
DRAKayes	3	Fégui	Mali	12	1	8	2	12	14.6212	-12.1483		
DNA	4	Moussala	Mali	360	36	252	72	360	13.6863	-12.0486		
DNA	5	Kéniékéniéba	Mali	6	1	4	1	6	13.3748	-11.8652	KENIEBA	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée
DNA	6	Gorbou	Mali	10	1	7	2	10	12.8328	-11.3867		
TOTAL				430	43	301	86	430				
FICHIERS CULTURE					SORGHO CSF 120j 7Nov	MAIZ CSF 120j 7nov	Légumes CSF 100j 7Dec					
FICHIERS SOLS					Falo.SOI	Falo.SOI	Falo.SOI					

S.A.E.D-Bakel										Fichier Climat et Précip.		
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	Sorgho 10%	Mais 70%	Maraichage 20%	TOTAL 0%	Latitude	Longitude	Evapotranspiration	Pluie
S.A.E.D-Bakel	1	Sébou	Sénégal	40	4	28	8	40	14.6851	-12.1765		
	2	Sintiou Déboukoulé	Sénégal	20	2	14	4	20	14.6364	-12.1515	Bakel	Bakel Quin Sèche
	3	Djimbé	Sénégal	15	2	11	3	15	14.6194	-12.1665		
	4	Dialiquel	Sénégal	30	3	21	6	30	14.5616	-12.2032		
	5	Sinthiou Dialigal	Sénégal	20	2	14	4	20	14.5436	-12.2220		
	6	Houro Imadou	Sénégal	20	2	14	4	20	14.5158	-12.2210		
	7	Séling	Sénégal	25	3	18	5	25	14.4964	-12.2254		
	8	Kidira	Sénégal	15	2	11	3	15	14.4674	-12.2173		
	9	Alahina	Sénégal	14	1	10	3	14	14.4332	-12.1994		
	10	Nayé	Sénégal	25	3	18	5	25	14.4197	-12.2081		
	11	Djita	Sénégal	20	2	14	4	20	14.3763	-12.2255		
	12	Doundé	Sénégal	30	3	21	6	30	14.2986	-12.2372		
	13	Débou Diaoubé	Sénégal	40	4	28	8	40	14.2975	-12.2242		
	14	Bountou	Sénégal	30	3	21	6	30	14.2420	-12.2288		
	15	Hamdallaye	Sénégal	20	2	14	4	20	14.2072	-12.2247		
	16	Fanira	Sénégal	20	2	14	4	20	14.1788	-12.2230		
	17	Takoutala	Sénégal	25	3	18	5	25	14.1545	-12.2396		
	18	Sitabanta	Sénégal	6	1	4	1	6	14.1089	-12.2040		
	19	Lalli	Sénégal	6	1	4	1	6	14.1133	-12.1926		
	20	Madina Tiacol	Sénégal	8	1	6	2	8	14.0441	-12.1899		
	21	Sambayayé- Sekonc	Sénégal	6	1	4	1	6	14.0064	-12.1945		
	22	Tomboura	Sénégal	10	1	7	2	10	13.9676	-12.2169		
	23	Sansanding	Sénégal	6	1	4	1	6	13.9309	-12.2137		
	24	Kaourou	Sénégal	6	1	4	1	6	13.6221	-12.0412		
	25	Laminéa	Sénégal	8	1	6	2	8	13.6089	-12.0253		
	26	Soréto Saousiré	Sénégal	4	0	3	1	4	13.4927	-11.9091		
	27	Diabougou	Sénégal	4	0	3	1	4	13.4320	-11.8766		
	28	Sonkounkou	Sénégal	4	0	3	1	4	13.3863	-11.8909		
TOTAL				477	48	334	95	477				
FICHIERS CULTURE					SORGHO CSF 120j 7Nov	MAIZ CSF 120j 7nov	Légumes CSF 100j 7Dec					
FICHIERS SOLS					Falo.SOI	Falo.SOI	Falo.SOI					

Figure B-4 Les superficies potentielles de cultures irriguées retenues pour la contre-saison froide

CULTURES IRRIGUÉES HIVERNAGE MALI										
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	RIZ	Polycole	40% Riz	40% Sorgho	20% Mais	
DRAKayes	1	Gouthioubé	Mali	150	s/d	s/d	60	60	30	
DRAKayes	2	Sangalou	Mali	60	s/d	s/d	24	24	12	Fichier Climat et Précip.
DRAKayes	3	Féqui	Mali	60	s/d	s/d	24	24	12	Evapotrans. Pluie
TOTAL				270			108	108	54	Bakel Bakel Quin Sèche A
DNA	4	Moussala	Mali	1800	s/d	s/d	720	720	360	
DNA	5	Kaniékanéba	Mali	30	s/d	s/d	12	12	6	Fichier Climat et Précip.
DNA	6	Gorbou	Mali	50	s/d	s/d	20	20	10	Evapotrans. Pluie
TOTAL				1880			752	752	376	KENIEBA KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée B
							FICHIERS CULTURE	RIZ direct Hiv 118j Jul	SORGHO Hiv 125j 1Jul	MAIZ Hiv 95j 21Jun
							FICHIERS SOLS	Peu Perméable	Fondé SOI	Fondé SOI
							Potentiel	Riz	Sorgho	Mais
Grand Total				2150			860	860	430	

CULTURES IRRIGUÉES HIVERNAGE SÉNÉGAL											
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	RIZ	Polycole	Given Riz	2/3 of Polycole Sorgho	1/3 of Polycole Mais		
S.A.E.D-Bakel	1	Sébou	Sénégal	200	50	150	50	100	50		
	2	Sinthiou Déboukoulé	Sénégal	100	20	80	20	53	27	Fichier Climat et Précip.	
	3	Djimbé	Sénégal	75	10	65	10	43	22	Evapotrans. Pluie	
	TOTAL				375	80	295	80	197	98	Bakel Bakel Quin Sèche C
	4	Dialiguel	Sénégal	150	30	120	30	80	40		
	5	Sinthiou Dialigal	Sénégal	100	20	80	20	53	27		
	6	Houro Imadou	Sénégal	100	20	80	20	53	27		
	7	Séling	Sénégal	125	20	105	20	70	35		
	8	Kidira	Sénégal	75	15	60	15	40	20		
	9	Alahina	Sénégal	70	5	65	5	43	22		
	10	Nayé	Sénégal	125	15	110	15	73	37		
	11	Djita	Sénégal	100	10	90	10	60	30		
	12	Doundé	Sénégal	150	10	140	10	93	47	Fichier Climat et Précip.	
	13	Débou Diaoubé	Sénégal	200	50	150	50	100	50	Evapotrans. Pluie	
	TOTAL				1195	195	1000	195	667	333	Kidira Kidira Quin Sèche D
	14	Boutou	Sénégal	150	20	130	20	87	43		
	15	Hamdallaye	Sénégal	100	70	30	70	20	10		
	16	Fanira	Sénégal	100	60	40	60	27	13		
	17	Takoutala	Sénégal	125	80	45	80	30	15		
	18	Sitabanta	Sénégal	30	0	30	0	20	10		
	19	Lalli	Sénégal	30	0	30	0	20	10		
	20	Madina Tiacol	Sénégal	40	10	30	10	20	10		
	21	Sambayayé- Sekonc	Sénégal	30	10	20	10	13	7		
22	Tomboura	Sénégal	50	15	35	15	23	12	Fichier Climat et Précip.		
23	Sansanding	Sénégal	30	10	20	10	13	7	Evapotrans. Pluie		
TOTAL				685	275	410	275	273	137	Kenieba KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée E	
24	Kaourou	Sénégal	30	10	20	10	13	7			
25	Laminéa	Sénégal	40	15	25	15	17	8			
26	Soréto Saouisiré	Sénégal	20	0	20	0	13	7			
27	Diabougou	Sénégal	20	0	20	0	13	7	Fichier Climat et Précip.		
28	Sonkounkou	Sénégal	20	0	20	0	13	7	Evapotrans. Pluie		
TOTAL				130	25	105	25	70	35	Kidira KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée F	
							FICHIERS CULTURE	RIZ direct Hiv 118j Jul	SORGHO Hiv 125j 1Jul	MAIZ Hiv 95j 21Jun	
							FICHIERS SOLS	Peu Perméable	Fondé SOI	Fondé SOI	
							Potentiel	RIZ	Sorgho	Mais	
Grand Total				2385	575	1810	575	1207	603		

Figure B-5 Structure d'organisation pour simulations (Hivernage)

CULTURES IRRIGUÉES Contre Saison Froide = 20% superficie Cultures Irriguées en HIVERNAGE										MALI	
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraichage	TOTAL			
					10%	70%	20%	100%			
DRAKayes	1	Gouthioubé	Mali	30	3	21	6	30			
DRAKayes	2	Sangalou	Mali	12	1	8	2	12	Fichier Climat et Précip.		
DRAKayes	3	Fégui	Mali	12	1	8	2	12	Evapotrans.	Pluie	
			TOTAL	54	5	38	11	54	Bakel	Bakel Quin Sèche	G
DNA	4	Moussala	Mali	360	36	252	72	360			
DNA	5	Kéniékéniéba	Mali	6	1	4	1	6	Fichier Climat et Précip.		
DNA	6	Gorbou	Mali	10	1	7	2	10	Evapotrans.	Pluie	
			TOTAL	376	38	263	75	376	KENIEBA	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	H
FICHIERS CULTURE					SORGHO CSF 120j 7Nov	MAIZ CSF 120j 7nov	Légumes CSF 100j 7Dec				
FICHIERS SOLS					Falo.SOI	Falo.SOI	Falo.SOI				
				Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraichage	TOTAL			
Grand Total				430	43	301	86	430			

CULTURES IRRIGUÉES Contre Saison Froide = 20% superficie Cultures Irriguées en HIVERNAGE										SÉNÉGAL	
Source	No	Nom	Pays	Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraichage	TOTAL			
					10%	70%	20%	0%			
S.A.E.D-Bakel	1	Sébou	Sénégal	40	4	28	8	40			
	2	Sintiou Déboukoulé	Sénégal	20	2	14	4	20	Fichier Climat et Précip.		
	3	Djimbé	Sénégal	15	2	11	3	15	Evapotrans.	Pluie	
			TOTAL	75	8	53	15	75	Bakel	Bakel Quin Sèche	I
	4	Dialiguel	Sénégal	30	3	21	6	30			
	5	Sinthiou Dialigal	Sénégal	20	2	14	4	20			
	6	Houro Imadou	Sénégal	20	2	14	4	20			
	7	Séling	Sénégal	25	3	18	5	25			
	8	Kidira	Sénégal	15	2	11	3	15			
	9	Alahina	Sénégal	14	1	10	3	14			
	10	Nayé	Sénégal	25	3	18	5	25			
	11	Djita	Sénégal	20	2	14	4	20			
	12	Doundé	Sénégal	30	3	21	6	30	Fichier Climat et Précip.		
13	Débou Diaoubé	Sénégal	40	4	28	8	40	Evapotrans.	Pluie		
		TOTAL	239	24	167	48	239	Kidira	Kidira Quin Sèche	J	
14	Bountou	Sénégal	30	3	21	6	30				
15	Hamdallaye	Sénégal	20	2	14	4	20				
16	Fanira	Sénégal	20	2	14	4	20				
17	Takoutala	Sénégal	25	3	18	5	25				
18	Sitabanta	Sénégal	6	1	4	1	6				
19	Lalli	Sénégal	6	1	4	1	6				
20	Madina Tiacol	Sénégal	8	1	6	2	8				
21	Sambayayé- Sekonc	Sénégal	6	1	4	1	6				
22	Tomboura	Sénégal	10	1	7	2	10	Fichier Climat et Précip.			
23	Sansanding	Sénégal	6	1	4	1	6	Evapotrans.	Pluie		
		TOTAL	137	14	96	27	137	Kenieba	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	K	
24	Kaourou	Sénégal	6	1	4	1	6				
25	Laminéa	Sénégal	8	1	6	2	8				
26	Soréto Saousiré	Sénégal	4	0	3	1	4				
27	Diabougou	Sénégal	4	0	3	1	4	Fichier Climat et Précip.			
28	Sonkounkou	Sénégal	4	0	3	1	4	Evapotrans.	Pluie		
		TOTAL	26	3	18	5	26	Kidira	KENIEBA Sèche 3 sur 4 Générée	L	
FICHIERS CULTURE					SORGHO CSF 120j 7Nov	MAIZ CSF 120j 7nov	Légumes CSF 100j 7Dec				
FICHIERS SOLS					Falo.SOI	Falo.SOI	Falo.SOI				
				Potentiel	Sorgho	Maïs	Maraichage	TOTAL			
Grand Total				477	48	334	95	477			

Figure B-6 Structure d'organisation pour simulations (Contre-saison froide)

		Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	août	Sept	Oct	Nov	Déc	
HIVERNAGE	en l/s/ha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.20	0.26	0.25	0.45	0.04	0.00	A
	en l/s/ha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.02	0.01	0.03	0.17	0.02	0.00	B
	en l/s/ha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.11	0.21	0.22	0.43	0.05	0.00	C
	en l/s/ha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.04	0.01	0.29	0.35	0.05	0.00	D
	en l/s/ha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.02	0.01	0.03	0.14	0.01	0.00	E
	en l/s/ha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.01	0.00	0.02	0.18	0.04	0.00	F
CONTRE SAISON FROIDE	en l/s/ha	0.68	0.78	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.40	G
	en l/s/ha	0.66	0.77	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.37	H
	en l/s/ha	0.68	0.78	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.40	I
	en l/s/ha	0.84	1.03	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.46	J
	en l/s/ha	0.66	0.77	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.37	K
	en l/s/ha	0.84	1.03	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.46	L

Figure B-7 Besoins nets en eau par hectare selon les assolements retenus (A à F : hivernage ; G à L : contre-saison froide)

Superficie en ha		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
270	en l/s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	143.10	54.00	70.20	67.50	121.50	10.80	0.00	A
1880	en l/s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	714.40	37.60	18.80	56.40	319.60	37.60	0.00	B
375	en l/s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	105.00	41.25	78.75	82.50	161.25	18.75	0.00	C
1195	en l/s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	215.10	47.80	11.95	346.55	418.25	59.75	0.00	D
685	en l/s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	260.30	13.70	6.85	20.55	95.90	6.85	0.00	E
130	en l/s	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.70	1.30	0.00	2.60	23.40	5.20	0.00	F
54	en l/s	36.72	42.12	9.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.18	21.60	G
376	en l/s	248.16	289.52	60.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.40	139.12	H
75	en l/s	51.00	58.50	12.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.75	30.00	I
239	en l/s	200.76	246.17	47.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.63	109.94	J
137	en l/s	90.42	105.49	21.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.55	50.69	K
26	en l/s	21.84	26.78	5.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.42	11.96	L
Besoins NET pour Irrigation	en m ³ /s	0.65	0.77	0.16	0.00	0.00	1.46	0.20	0.19	0.58	1.14	0.28	0.36	
Besoins BRUT pour Irrigation	en m ³ /s	1.16	1.37	0.28	0.00	0.00	2.61	0.35	0.33	1.03	2.04	0.51	0.65	
		Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	août	Sept	Oct	Nov	Déc	
Efficience	Primaire /Secondaire/Tertiaire						70%	A	Voir Calculs en Annexe					
	Efficience à l'application et au prélèvement						80%	B						
	Global						56%	A*B						

Figure B-8 Besoins nets et besoins bruts en eau selon les assolements retenus

Effectif du Cheptel des cercles de la Région de Kayes				1999/2000		
	Bovins	Ovins	Caprins	UBT	Equins	Asins
Kita	127,977	31,341	58,420	72,965	634	487
Kéniéba	120,000	35,000	40,000	67,500	80	0
Bafoulabé	121,430	99,524	96,296	80,297	2,371	0
Total	369,407	165,865	194,716	220,762	3,085	487
Source : DRAMR 1999						
Une Unité Bétail Tropical (UBT) est égales à 2 bovins, 10 ovins et 10 caprins						
Effectif du Cheptel des cercles de la Région de Kayes				2010 (Janv à Déc)		
	Bovins	Ovins	Caprins	UBT	Equins	Asins
Kita	156,259	64,795	94,925	94,102	634	4,245
Kéniéba	148,610	45,146	56,723	84,492	114	852
Bafoulabé	136,590	138,915	136,599	95,846	2,653	7,428
Total	441,459	248,856	288,247	274,440	3,401	12,525
Source : DRAMR 1999						
Une Unité Bétail Tropical (UBT) est égales à 2 bovins, 10 ovins et 10 caprins						
Taux de croissance du Cheptel de la Région de Kayes						
	Bovins	Ovins	Caprins			
Taux de croissance Annuel prédit en 1999	3.00%	10.00%	11.00%			
Taux de croissance réel obtenu entre 1999 et 2010	1.80%	4.15%	4.00%			
Taux de croissance du Cheptel de la Région de Kayes						
	Bovins	Ovins	Caprins			
Taux de croissance Annuel	1.80%	4.15%	4.00%			
Croissance relative de 2010 à 2025	1.306822701	1.840302068	1.8009435			
1 UBT =	2	10	10			
Source : DRAMR 1999						
Une Unité Bétail Tropical (UBT) est égales à 2 bovins, 10 ovins et 10 caprins						

Figure B-9 Détermination du taux de croissance du cheptel de la Région de Kayes

TRANSHUMANCE INTERNE									
Les transhumants ont effectué leurs mouvements cycliques du Nord au Sud de la région en fonction des saisons, sans contraintes majeures.									
LOCALITES	POSTE DE CONTROLE	PROVENANCE	DESTINA TION	TRANSIT		N° ET DATE DE DELIVRANCE DU CV	ESPECES	NOMBRE	OBSERVATIONS
				Poste	Date				
Kayes	Kayes	Ségala- Djandiouméra- Kayes- Aourou	Diamou- Bafoulabé- Kéniéba	Diéma-Sadiola	-	-	Bovins	1740	Soit au total : Bovins=144 813 Ovins= 103 275 Caprins= 35 935 Asins= 2 057 Equins=100
							Ovins	21740	
							Caprins	10960	
							Asins	750	
Diéma	Diéma	Nioro-Nara	Diéma	Diéma	-	-	Bovins	5963	
							Ovins	12765	
							Caprins	3555	
Nioro	Sandaré- Gavinané- Nioro	Gogui	Lakamané- Séfété	Sandaré	-	-	Bovins	13110	
							Ovins	24770	
							Caprins	19020	
							Asins	907	
							Equins	100	
Bafoulabé	Bafoulabé	Nior-Yélimané- Diéma	Bafoulabé	Bafoulabé	-	-	Bovins	124000	

		BOVINS	OVINS	CAPRINS	EQUINS	ASINS		
Transhumance 2010		144,813	103,275	35,935	100	2,057		
Consommation litres /jour ---->		35	4,6	4,6	35	35	Sur 8hr/jr	
Par jour ->		m ³ /jr	5,068	475	165	4	72	l/s
						Total en m3		
Février	28	141,917	13,302	4,628	98	2,016	161,961	181
Mars	31	157,122	14,727	5,124	109	2,232	179,314	201
Avril	30	152,054	14,252	4,959	105	2,160	173,529	194
Mai	31	157,122	14,727	5,124	109	2,232	179,314	201
Juin	15	76,027	7,126	2,480	53	1,080	86,765	97
Transhumance 2025		189,245	190,057	64,717	130	2,500		
		35	4,6	4,6	35	35	Sur 8hr/jr	
Par jour		m ³ /jr	6,624	874	298	5	88	l/s
						Total en m3		
Février	28	185,460	24,479	8,336	127	2,450	220,852	247
Mars	31	205,331	27,102	9,229	141	2,713	244,515	274
Avril	30	198,707	26,228	8,931	137	2,625	236,627	265
Mai	31	205,331	27,102	9,229	141	2,713	244,515	274
Juin	15	99,354	13,114	4,465	68	1,313	118,314	133

Figure B-10 Détermination des besoins en eau du cheptel de la Région de Kayes s'abreuvant à la Falémé

Effectif du Cheptel du Département de Bakel						1999/2000	
	Bovins	Ovins	Caprins	UBT	Equins	Asins	
Total	308096	286516	269298	209,629	9301	32864	
	92,429	85,955	80,789	62,889	2,790	9,859	
Assumé % s'abreuvant à la Falémé 30% (rapport de débit moyen avec celui du Fleuve)							
Une Unité Bétail Tropical (UBT) est égales à 2 bovins, 10 ovins et 10 caprins							
Taux de croissance du Cheptel de la Région de Kayes							
	Bovins	Ovins	Caprins				
Taux de croissance réel obtenu entre 1999 et 2010	1.80%	4.15%	4.00%				
Taux de croissance du Cheptel assumé pour le département de Bakel							
	Bovins	Ovins	Caprins				
Taux de croissance Annuel	2.50%	4.00%	4.00%				
Croissance relative de 2000 à	1.45	1.80	1.80				
Croissance relative de 2000 à	1.85	2.67	2.67				
	1 UBT =	2	10	10			
Source : DRAMR 1999							
Une Unité Bétail Tropical (UBT) est égales à 2 bovins, 10 ovins et 10 caprins							
	BOVINS	OVINS	CAPRINS	EQUINS	ASINS		
Cheptel du dept de Bakel ayant impact sur Falémé en 2000 -->	92,429	85,955	80,789	2,790	9,859		
Cheptel du dept de Bakel ayant impact sur Falémé en 2015 -->	133,864	154,800	145,497	2,000	9,500		
Consommation litres /jour -->	35	4.6	4.6	35	35	Total en m ³	Sur 8hr/jr
Par jour	m ³ /jr	4,685	712	669	70			333	l/s
Février	28	131,187	19,938	18,740	1,960	9,310	181,135
Mars	31	145,243	22,074	20,748	2,170	10,308	200,543
Avril	30	140,558	21,362	20,079	2,100	9,975	194,074
Mai	31	145,243	22,074	20,748	2,170	10,308	200,543
Juin	15	70,279	10,681	10,039	1,050	4,988	97,037
Cheptel du dept de Bakel ayant impact sur Falémé en 2025 -->	171,358	229,141	215,371	2,790	10,000		
Consommation litres /jour -->	35	4.6	4.6	35	35	Total en m ³	Sur 8hr/jr
Par jour	m ³ /jr	5,998	1,054	991	98			350	l/s
Février	28	167,931	29,513	27,740	2,734	9,800	237,718
Mars	31	185,923	32,676	30,712	3,027	10,850	263,188
Avril	30	179,926	31,622	29,721	2,930	10,500	254,698
Mai	31	185,923	32,676	30,712	3,027	10,850	263,188
Juin	15	89,963	15,811	14,861	1,465	5,250	127,349

Figure B-11 Détermination des besoins en eau du cheptel du Département de Bakel s'abreuvant à la Falémé

Évaporation Bakel et Évaluation des pertes par Évaporation													
Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Nbr de jours -->	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1ère décade	80.5	84.1	117.7	124.3	123.8	98.5	109.5	67.5	58.4	55.5	86.6	68.7	
2ième décade	95.6	99.9	108.7	143.7	114.4	126	87.6	75.7	49.3	56.5	86.5	93.8	
3ième décade	98.3	116.6	125.1	135.9	114.1	107.9	67.6	57.8	53.8	68.4	81.3	98.4	
Total / mois	274.4	300.6	351.5	403.9	352.3	332.4	264.7	201	161.5	180.4	254.4	260.9	3338
Moyenne /jour	8.85	10.74	11.34	13.46	11.36	11.08	8.54	6.48	5.38	5.82	8.48	8.42	
Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Bakel Préc Quin Sèche	0	0	0	0	0	35	85	95	155	20	0	0	390
Kidira Préc Quin Sèche	0	0	0	0	16	45	106	200	73	21	0	0	461
Kéniéba Préc Quin sèche	0	0.1	0.2	5.2	49.6	160.1	252	352.8	245.1	83.6	3.6	0.2	1152.5
Précipitation pondérée (15% Bakel / 67% Kidira / 18% Kéniéba voir calculs ci-dessous) en mm	0.0	0.0	0.1	1.3	21.9	72.2	139.3	221.9	128.8	36.5	0.9	0.1	622.9
Évaporation - Précipitation (mm /mois)	274.4	300.6	351.4	402.6	330.4	260.2	125.4	-20.9	32.7	143.9	253.5	260.8	2715.1
Évaporation - Précipitation (mm/jour)	8.9	10.7	11.3	13.4	10.7	8.7	4.0	-0.7	1.1	4.6	8.4	8.4	
	1.02E-07	1.24E-07	1.31E-07	1.55E-07	1.23E-07	1.00E-07	4.68E-08	-7.82E-09	1.26E-08	5.37E-08	9.78E-08	9.74E-08	
Largeur moyenne d'écoulement	60	50	30	20	20	60	100	130	150	100	80	60	
Longueur d'écoulement m	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	249,200	
Pertes par évaporation en m ³ /s	1.5	1.5	1.0	0.8	0.6	1.5	1.2	-0.3	0.5	1.3	1.9	1.5	
Tronçon	Longueur (km)	%	Adj										
de Bakel à Kidira	51.5	21%	15%										
de Kidira au barrage	197.7	79%	59%										
du barrage à Kéniéba	124.7	33%	25%										
Total	373.9	133%	100%										

Figure B-12 Détermination des pertes par évaporation de la Falémé

Département de Bakel		Riz	MIL	Sorgho	Maïs	Arach	Fonio	Bissap	Total	Céréales	% Céréales	
pluvial	1985	1986	468	3593	3018	2018	3221	0	0	12318	9097	74%
	1986	1987	0	959	3847	2327	321	0	0	7454	7133	96%
	1987	1988	154	1240	4114	1115	1417	0	0	8040	6623	82%
	1988	1989	1889	5450	9230	3223	1192	0	0	20984	19792	94%
1985	1989	TOTAL	2511	11242	20209	8683	6151	0	0	48796	42645	87%
1985	1989	%	5%	23%	41%	18%	13%	0	0	100.0%	87.4%	87%
	1989	1990	1404	2665	10793	3444	3900	0	0	22206	18306	82%
		%	6%	12%	49%	16%	18%	0%	0%	100.0%		
Département de Bakel		Riz	MIL	Sorgho	Maïs	Arach	Fonio	Bissap	Total	Céréales	% Céréales	
Pluvial	2009	2010	186	3371	3383	2104	0	83	12282	10178	83%	
		%	2%	27%	28%	26%	17%	0%	100.0%			
		ASSUME	6%	20%	37%	20%	17%		100.0%			
Falème Cercle de Kayes		Riz Récolté	MIL	Sorgho	Maïs	Arach	Fonio		Total	Total Céréales	% Céréales	
Pluvial	2009	2010	200	600	1010	950	760	25	3545	2760	78%	
		%	6%	17%	28%	27%	21%	1%	100%			
Département de Bakel		Riz Cultivé	Riz Récolté	Sorgho	Maïs	Maraichage	Superficie Aménagée Totale	Superficie Cultivée Totale	% Cultiv./Aménag.			
Hivernage	1985	1986	562	548	201	165	0	1152	928	80.6%		
	1986	1987	503	391	443	165	0	1467	1111	75.7%		
	1987	1988	396	396	449	152	0	1704	997	58.5%		
	1988	1989	647	558	487	116	0	1842	1250	67.9%		
1985	1989	TOTAL	2108		1580	598	0	6165	4286	69.5%		
1985	1989	%	34%		26%	10%	0	69.5%				
		% adjustd	49%		37%	14%		100.0%				
		ASSUME	40%		40%	20%		100.0%				
Département de Bakel		Riz Cultivé	Riz Récolté	SORGHO	MAÏS	MARAICHAG	TOTAL	Superficie Cultivée Hivernage	% CSF/Hivernage			
Contre Saison Froide	1985	1986			5	176	15	196	928	21.1%		
	1986	1987			0	218	11	229	1111	20.6%		
	1987	1988			25	126	30	181	997	18.2%		
	1988	1989			4	84	50	138	1250	11.0%		
1985	1989	TOTAL			34	604	106	744	4286	17.4%		
1985	1989	%			5%	81%	14%	100%				
		Scenario			10%	70%	20%	100%				

Nous retenons une superficie de cultures irriguées en Contre-Saisons Froide égale au maximum à 20% de la superficie des cultures irriguées en hivernage

Figure B-13 Détermination des assolements et superficies irriguées relatives

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\Légumes CSF 100j 7Dec.CRO)

Culture: Small Vegetables Date de plantation: 14/04 Récolte: 22/07

Phase	initiale	croissa	mi-	arri	total
Durée (jours)	20	30	30	20	100
Kc Valeurs	0.40	-->	1.20	0.80	
Profondeur d'enracin	0.25	-->	0.60	0.60	
Épuisement maximum	0.30	-->	0.45	0.50	
Réponse du rendement	0.80	0.40	1.20	1.00	1.00
Hauteur de culture (			0.30		

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\MAIZ CSF 120j 7nov.CRO)

Culture: MAIZE (Grain) Date de plantation: 14/04 Récolte: 11/08

Phase	initiale	croissa	mi-	arri	total
Durée (jours)	20	40	50	10	120
Kc Valeurs	0.50	-->	1.20	0.60	
Profondeur d'enracin	0.30	-->	1.00	1.00	
Épuisement maximum	0.55	-->	0.55	0.80	
Réponse du rendement	0.40	0.40	1.30	0.50	1.25
Hauteur de culture (			2.00		

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\MAIZ Hiv 95j 21Jun.CRO)

Culture: MAIZE (Grain) Date de plantation: 14/04 Récolte: 17/07

Phase	initiale	croissa	mi-	arri	total
Durée (jours)	20	30	35	10	95
Kc Valeurs	0.50	-->	1.20	0.60	
Profondeur d'enracin	0.30	-->	1.00	1.00	
Épuisement maximum	0.55	-->	0.55	0.80	
Réponse du rendement	0.40	0.40	1.30	0.50	1.25
Hauteur de culture (			2.00		

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\RIZ direct Hiv 118j Jul.CRO)

Culture: Riz Hiver Jaya Date de semis: 14/04 Récolte: 09/08

Phase	prep. sol		phase de croissance			total	
	total	mise en b	initiale	croissa	mi- arri		
Durée (jours)	15	5	30	25	38	25	118
Kc sec		0.30	0.50	-->	1.05	0.70	
Kc humide		1.05	1.15	-->	1.30	1.05	
Prof. enracinement (			0.10	-->	0.60	0.60	
Hauteur mise en boue		0.40					
Épuisement maximum			0.20	-->	0.20	0.20	
Réponse rendement (f			1.00	1.09	1.09	1.09	1.09
Hauteur de culture (					1.00		

Figure B-17 Les fichiers de culture : Légumes / Maïs et Riz

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\TOMATE CSF 120j 7 Dec.CRO)

Culture: Tomato		Date de plantation: 14/04		Récolte: 11/08	
Phase	initiale	croissa	mi-	arri	total
Durée (jours)	10	30	40	40	120
Kc Valeurs	0.50	-->	1.25	0.65	
Profondeur d'enracin	0.25	-->	1.00	1.00	
Épuisement maximum	0.30	-->	0.40	0.50	
Réponse du rendement	0.50	0.60	1.10	0.80	1.05
Hauteur de culture (			0.60		

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\SORGHO CSF 120j 7Nov.CRO)

Culture: SORGHUM (Grain)		Date de plantation: 14/04		Récolte: 16/08	
Phase	initiale	croissa	mi-	arri	total
Durée (jours)	20	35	40	30	125
Kc Valeurs	0.30	-->	1.10	0.55	
Profondeur d'enracin	0.30	-->	1.40	1.40	
Épuisement maximum	0.60	-->	0.50	0.80	
Réponse du rendement	0.20	0.40	0.55	0.20	0.90
Hauteur de culture (			1.50		

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\SORGHO Hiv 125j 1Jul.CRO)

Culture: SORGHUM (Grain)		Date de plantation: 14/04		Récolte: 16/08	
Phase	initiale	croissa	mi-	arri	total
Durée (jours)	20	35	40	30	125
Kc Valeurs	0.30	-->	1.10	0.55	
Profondeur d'enracin	0.30	-->	1.40	1.40	
Épuisement maximum	0.60	-->	0.50	0.80	
Réponse du rendement	0.20	0.40	0.55	0.20	0.90
Hauteur de culture (			1.50		

Figure B-18 Les fichiers de culture : Légumes / Tomate et Sorgho

(Fichier:C:\CROPWAS\data\soils\Gourbassi\Falo Alluvial.SOI)

Nom du sol: Alluvia

Données générales sur le sol:

Eau disponible totale (CC - PF)	100.0	mm/mètre
Taux d'infiltration maximum de l'eau de	100	mm/jour
Profondeur maximum d'enracinement	900	centimètres
Épuisement de la teneur en eau initiale	50	%
Eau disponible initiale	50.0	mm/mètre

(Fichier:C:\CROPWAS\data\soils\Gourbassi\Fondé 70% sand 30% Clay.SOI)

Nom du sol: 70% Sand 30% Clay

Données générales sur le sol:

Eau disponible totale (CC - PF)	150.0	mm/mètre
Taux d'infiltration maximum de l'eau de	70	mm/jour
Profondeur maximum d'enracinement	900	centimètres
Épuisement de la teneur en eau initiale	50	%
Eau disponible initiale	75.0	mm/mètre

Figure B-19 Les fichiers de sols : Falo alluvial et Fondé 70% sable 30% argile

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\Assolement A et B.PAT)

Nom de l'assolement: Hiver Mali A

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	RIZ direct Hiv 118j	Riz Hiver Jaya	01/07/19	26/10/19	40
2	SORGHO Hiv 125j 1Jul	SORGHUM (Grain)	07/07/19	08/11/19	40
3	MAIZ Hiv 95j 21Jun.C	MAIZE (Grain)	15/07/19	17/10/19	20

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\Assolement C.PAT)

Nom de l'assolement: Hiver Mali C

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	RIZ direct Hiv 118j	Riz Hiver Jaya	01/07	26/10	21
2	SORGHO Hiv 125j 1Jul	SORGHUM (Grain)	07/07	08/11	52
3	MAIZ Hiv 95j 21Jun.C	MAIZE (Grain)	15/07	17/10	26

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\Assolement D.PAT)

Nom de l'assolement: Hiver Mali D

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	RIZ direct Hiv 118j	Riz Hiver Jaya	01/07	26/10	16
2	SORGHO Hiv 125j 1Jul	SORGHUM (Grain)	07/07	08/11	56
3	MAIZ Hiv 95j 21Jun.C	MAIZE (Grain)	15/07	17/10	28

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\Assolement E.PAT)

Nom de l'assolement: Hiver Mali E

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	RIZ direct Hiv 118j	Riz Hiver Jaya	01/07	26/10	40
2	SORGHO Hiv 125j 1Jul	SORGHUM (Grain)	01/07	02/11	40
3	MAIZ Hiv 95j 21Jun.C	MAIZE (Grain)	01/07	03/10	20

(Fichier:C:\CROPWAS\data\crops\Gourbassi\Assolement F.PAT)

Nom de l'assolement: Hiver Mali F

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	RIZ direct Hiv 118j	Riz Hiver Jaya	01/07	26/10	19
2	SORGHO Hiv 125j 1Jul	SORGHUM (Grain)	07/07	08/11	54
3	MAIZ Hiv 95j 21Jun.C	MAIZE (Grain)	15/07	17/10	27

Figure B-20 Les fichiers d'assolement pour cultures irriguées en hivernage

(Fichier:C:\CROPWA8\data\crops\Gourbassi\Assolement G et I.PAT)

Nom de l'assolement: CSF G et I

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	SORGHO CSF 120j 7Nov	SORGHUM (Grain)	07/11	11/03	10
2	MAIZ CSF 120j 7nov.C	MAIZE (Grain)	07/11	06/03	70
3	Légumes CSF 100j 7De	Small Vegetables	07/12	16/03	20

(Fichier:C:\CROPWA8\data\crops\Gourbassi\Assolement H et K.PAT)

Nom de l'assolement: CSF H et K

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	SORGHO CSF 120j 7Nov	SORGHUM (Grain)	07/11	11/03	10
2	MAIZ CSF 120j 7nov.C	MAIZE (Grain)	07/11	06/03	70
3	Légumes CSF 100j 7De	Small Vegetables	07/12	16/03	20

(Fichier:C:\CROPWA8\data\crops\Gourbassi\Copie de AssolementJ et L.PAT)

Nom de l'assolement: CSF J et L

No.	Fichier Culture	Culture	Plantati date	Récolte date	Surface %
1	SORGHO CSF 120j 7Nov	SORGHUM (Grain)	07/11	11/03	10
2	MAIZ CSF 120j 7nov.C	MAIZE (Grain)	07/11	06/03	70
3	Légumes CSF 100j 7De	Small Vegetables	07/12	16/03	20

Figure B-21 Les fichiers d'assolement pour cultures irriguées en contre-saison froide

Région	Cercle	Commune	Village	Longitude	Latitude	Superficie (ha)	Spécifications	Nature site	Source Alimentation
Kayes	Kenieba	Dabia	Faléa	11°17	12°16	100	Maïs,riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Faléa	11°17	12°16	15	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dabia	Dabia	11°40	12°8	10	Riz,maïs	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Dabia	Dabia	11°40	12°8	15	Riz,maïs	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Dabia	Dabia	11°40	12°8	15	Riz,maïs	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Dabia	Dabia	11°40	12°8	20	Riz,maïs	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Dabia	Mankouké	11°29	12°9	50	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Dabia	Dabia	11°40	12°8	50	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Dabia	Sokondo	11°41	12°10	25	Riz,maïs	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Faraba	11°52	12°24	40	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Faraba	11°52	12°24	30	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Faraba	11°52	12°24	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Diréwalogo	11°04	12°20	20	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Darésalam I	11°58	12°12	30	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Gouba	11°8	12°11	20	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Babara	11°7	12°11	15	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Babara	11°7	12°11	20	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Koulo	12°7	12°11	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Liberta	11°7	12°11	15	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Afia	11°6	12°9	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Koulia	11°6	12°9	30	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Garodji	11°6	12°9	110	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Sagalo	11°5	12°17	200	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Sagalo	11°5	12°17	200	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Sagalo	11°5	12°17	100	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Sitandinyégué	11°4	12°20	40	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Niaria	11°5	12°15	100	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Alamakolan	11°4	12°16	7	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Fari	11°4	12°17	7	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Fari	11°4	12°17	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Fari	11°4	12°17	6	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Fari	11°4	12°17	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Sagalo	Galama	-	-	15	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	6	Riz	Plaine	ruissellement
kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	6	Riz	Plaine	ruissellement
kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	8	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	6	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	6	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Kroukoto	11°12	12°22	5	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Sansankoré	-	-	40	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Sansankoré	-	-	30	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Binda	11°9	12°19	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Binda	11°9	12°19	10	Riz	Plaine	ruissellement

Figure B-22 Les aménagements existants du Cercle de Kéniéba (pas de prélèvement de la Falémé) – La figure continue sur les deux pages suivantes

Région	Cercle	Commune	Village	Longitude	Latitude	Superficie (ha)	Spéculations	Nature site	Source Alimentation
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Binda	11°9	12°19	15	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Niarkira	-	-	10	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Niarkira	-	-	5	Riz	Plaine	ruissellement
Kayes	Kenieba	Faraba	Faraba	11°52	12°24	10	Riz	Plaine	ruissellementCours
Kayes	Kenieba	Kroukoto	Niarkira	-	-	8	Riz	Plaine	ruissellementCours
Kayes	Kenieba	Dabia	Dabia	11°40	12°8	18	Riz	Plaine	ruissellement
kayes	Kenieba	Guenou-Goré	Guénou-Goré	11°44	12°2	8	Riz	Bas-fond	Eau de ruissellement
kayes	Kenieba	Guenou-Goré	Guénou-Goré	11°44	12°2	10	Riz	Bas-fond	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Guenou-Goré	Guénou-Goré	11°44	12°2	20	Riz	Bas-fond	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Guenou-Goré	Kamboréa	11°14	12°12	15	Riz	Bas-fond	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Guenou-Goré	Tambafinia	11°18	12°14	12	Riz	Bas-fond	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Faléa	11°17	12°16	16	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Faléa	11°17	12°16	13	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Mankalabé	11°14	12°41	45	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Mankalabé	11°19	12°11	40	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Kambaya	11°12	12°2	45	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Kalli	11°9	12°23	50	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Faléa	Simbarakouré	11°8	12°23	50	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Moussala	11°19	12°32	300	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Tintiba	11°24	12°38	17,5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
kayes	Kenieba	Kenieba	Kéniéba	11°15	12°51	55	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Sansanto	11°16	12°53	40	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Hafia (Sanouougou)	11°17	12°48	15	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Kroukofè	11°15	12°51	17,5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Bérola	11°15	12°51	10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Nètèdakoto	11°15	12°51	12,5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Mokoyafara	11°36	12°35	10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Linguékoto I	11°12	12°46	15	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Djoulafoundouni	11°12	12°54	10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Djoulafoundou	11°11	12°54	250	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Manancoto	11°44	12°38	100	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kenieba	Selou	11°20	12°45	40	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Dialafara	11°23	12°28	65	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Diaguina	11°20	12°23	35	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Kégnéty	11°24	12°17	35	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Nètèkoto	11°23	12°22	20	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Bourdala	11°28	12°31	17,5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Bakagny	15°35	12°33	16	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Kégnébanding	11°53	12°22	10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Bérola	11°59	12°14	-	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Monéa	-	-	50	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dialafara	Manakoto	-	-	100	Riz	Plaine	Eau de ruissellement

Région	Cercle	Commune	Village	Longitude	Latitude	Superficie (ha)	Spéculations	Nature site	Source Alimentation
Kayes	Kenieba	Sitakily	Diantisan	11°15	12°11	17.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Koffi	11°20	12°12	25	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Djidian Kéniéba	11°24	12°27	25	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Allahina	-	-	10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Dabara	11°18	12°03	10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Djibroulla	11°15	12°14	35	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Kambélé	11°14	12°09	20	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Tamandji	11°12	12°05	17.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Baboto	11°21	12°08	12.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Batama	11°10	12°03	20	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Yatia	11°13	12°02	25	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Djilissouma	-	-	10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Sitakily	Madina	-	-	40	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Koulaya	11°05	12°02	6.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Koufara	11°09	12°07	5.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Farssoumato	11°06	12°11	7.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Kassama	11°08	12°03	3.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Kassama	11°08	12°03	4.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Kassama	11°08	12°03	5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Kassama	11°08	12°03	5.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Dioulafoundou	11°08	12°17	6.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kassama	Kamaya	-	-	4.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Dombia	Oualia	11°02	12°41	20	Riz	Bas-fond	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Sekokoto	11°33	12°51	30	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Tinko			10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Warawato			10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Bouli			10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Kama			20	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Longoyara			15	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Balandou			10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Dombou			20	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Bamioto			10	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Kambaya fara			25	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Bayé	Baladji			12.5	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
kayes	Kenieba	Guenou-Goré	Balandougou	-	-	20	Riz	Plaine	Eau de ruissellement
Kayes	Kenieba	Kontéla	Magnada	-	-	8	Riziculture	Plaine	Pluie

Culture Pluvial Département de Bakel									
Années	Mil			Sorgho			Maïs		
	Sup.(ha)	Rdt (Kg/ha)	Prod (t)	Sup.(ha)	Rdt (Kg/ha)	Prod (t)	Sup.(ha)	Rdt (Kg/ha)	Prod (t)
1994/1995	6300	869	5475	9500	1045	8928	6100	1138	6942
1995/1996	4804	986	4737	10207	1011	10319	4738	1387	6572
1996/1997	5286	1079	5704	9880	1068	10552	4290	1360	5834
1997/1998	4115	769	3164	7725	840	6489	3274	806	2639
1998/1999	5416	761	4122	12304	613	7542	3423	677	2317
1999/2000	5437	1138	6186	12919	753	9729	3765	985	3707
2000/2001	6631	1080	7161	12328	1001	12340	4178	1129	4717
2001/2002	6543	968	6334	9212	1016	9359	5133	882	4527
2002/2003	6947	1260	8753	7621	416	3170	5029	576	2897
2003/2004	7301	1257	9177	10849	1290	13995	7022	2745	19275
2004/2005									
2005/2006	9520	1075	10234	6276	1109	696	5218	2.5	13045
Années	Riz			Arachide huilerie			Niébé		
	Sup.(ha)	Rdt (Kg/ha)	Prod (t)	Sup.(ha)	Rdt (Kg/ha)	Prod (t)	Sup.(ha)	Rdt (Kg/ha)	Prod (t)
1994/1995	320	4000	1214	6000	1096	6576			
1995/1996	598	3250	2500	6935	711	4911	37	670	25
1996/1997	390	1190	464	38559	652	2516			
1997/1998	236	3500	826	2218	222	492			
1998/1999	145	4150	601	3841	1260	4840	435	800	348
1999/2000	145	5264	763	4225	1776	7502	457	823	376
2000/2001	13	4150	54	10366	900	9329	511	800	409
2001/2002	225	4500	1013	5462	992	5418	233	538	125
2002/2003	241	4000	964	6073	282	1713	650	450	293
2003/2004	229	5000	1145	5418	1156	6263	171	700	120
2004/2005									
2005/2006	63	5.7	359	8.921	1.1	9.813	109	600	65

Figure B-23 Les cultures pluviales du Département de Bakel

ANNEXE C

Résultats détaillés des simulations hydrauliques

Les tableaux de résultats des simulations seront présentés dans la version finale du rapport des études hydrotechniques.

ANNEXE D

Dossier photographique



Photo 1 Falémé au site de Gourbassi en période de hautes eaux – Vue vers l'aval (28 octobre 2010)



Photo 2 Falémé à Gourbassi au droit du barrage en période de décrue – Vue vers rive gauche (2 mars 2011)



Photo 3 Cultures de décrue le long de la Falémé à Berola et Sayansoutou (4 avril 2011)



Photo 4 La Falémé à Kidira (21 mars 2011)



Photo 5 La Falémé à Kidira (21 mars 2011)



Photo 6 Exemple d'un canal en terre avec prélèvement du fleuve Sénégal



Photo 7 Arrangement pour distribution aux parcelles



Photo 8 Prise d'eau à la Falémé de la mine de Tabakoto (4 mars 2011)