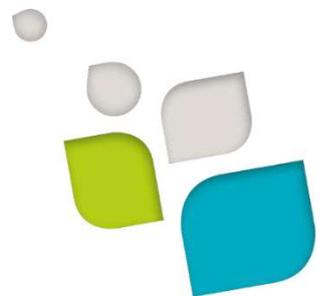




ETUDE D'ACTUALISATION DU PLAN D'ALERTE DANS LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

RAPPORT FINAL



Mars 2021



	<p>BRL ingénierie</p> <p>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5, France</p>
	<p>HYDROCONSULT International</p> <p>Liberté VI Extension Villa N°173 c BP 3626, DAKAR, Sénégal</p>

Date du document	26/03/2021
Contact	Gwenaël CHEVALLET

Titre du document	Étude d'actualisation du plan d'alerte dans le bassin du fleuve Sénégal – Rapport Final
Référence du document :	A00604_SENEGAL_PLANALERTE_RAPPORT_v3.docx
Indice :	V3

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
27/03/2020	V1	Rapport provisoire	GCH/GRI	MCG
26/08/2020	V2	Rapport final – prise en compte des remarques	GCH/GRI	MCG
26/03/2021	V3	Rapport final validé	GCH/GRI	MCG

ETUDE D'ACTUALISATION DU PLAN D'ALERTE DANS LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

Rapport

1	OBJECTIFS DE LA MISSION	17
2	CONTEXTE GÉNÉRAL	18
2.1	REGIME HYDROLOGIQUE NATUREL	18
2.2	GRANDS AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES	20
2.2.1	Barrage de Diama	20
2.2.2	Endiguements Diama-Rosso	21
2.2.3	Barrage de Manantali	22
2.2.4	Autres barrages existants ou projetés	23
3	RÉSUMÉ ET SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	24
3.1	LES PRECEDENTS PLANS D'ALERTE	24
3.2	LES BARRAGES EXISTANTS ET PROJETES	24
3.3	ANALYSE HYDROLOGIQUE	25
3.4	EVALUATION DES RISQUES LIES A LA DEFAILLANCE DES BARRAGES	26
3.5	ANALYSE HYDRAULIQUE	27
3.6	VULNERABILITE DES ENJEUX ET CAPACITE DE RESILIENCE	29
3.7	ACTUALISATION DES PLANS D'ALERTE ET DE RESILIENCE	30
3.7.1	Zones d'alerte retenues	30
3.7.2	Elaboration des nouveaux plans d'alerte	31
3.7.3	Elaboration des plans d'adaptation et de résilience des populations	32
3.8	PRECONISATIONS POUR LA MISE EN PLACE FUTURE D'UN SYSTEME D'ALERTE PRECOCE (SAP)	33
4	PRESENTATION DES PRECEDENTS PLANS D'ALERTE	34
4.1	HYPOTHESES DE CRUES	34
4.2	MODE D'EMPLOI DES PRECEDENTS PLANS D'ALERTE	34
5	PRESENTATION DES BARRAGES	39
5.1	PREAMBULE	39
5.2	PRESENTATION DU BARRAGE DE MANANTALI	43
5.2.1	Présentation générale	43
5.2.2	Conception générale de l'ouvrage	45
5.2.3	Le barrage proprement dit	47
5.2.4	Les ouvrages hydrauliques associés	48
5.2.5	L'usine hydroélectrique	50
5.2.6	Synthèse des vocations et du mode de gestion du barrage de Manantali	51
5.3	PRESENTATION DU BARRAGE DE DIAMA	54

5.3.1	Présentation générale	54
5.3.2	Bref historique de sa réalisation.....	57
5.3.3	La structure de l'ouvrage et ses aménagements connexes	57
5.3.4	Le barrage évacuateur et ses équipements connexes	59
5.3.5	Son écluse de 13 m par 175 m	60
5.3.6	Ses équipements et infrastructures connexes.....	62
5.3.7	Ses endiguements latéraux.....	63
5.3.8	Le réseau de routes et pistes d'accès	64
5.3.9	Mode de gestion du barrage de l'ouvrage	64
5.4	AUTRES BARRAGES EXISTANTS.....	65
5.4.1	Barrage de Félou.....	65
5.4.2	Barrage de Foum-Gleïta	69
5.5	BARRAGES PROJETES	71
5.5.1	Barrage de Balassa (Bafing).....	71
5.5.2	Barrage de Koukoutamba (Bafing)	76
5.5.3	Barrage de Boureya (Bafing).....	81
5.5.4	Barrage de Gouina (Bafing)	86
5.5.5	Barrage de Gourbassi (Falémé).....	88
6	ANALYSE HYDROLOGIQUE	92
6.1	OBJECTIFS	92
6.2	LES POINTS FORTS DE NOTRE ETUDE HYDROLOGIQUE.....	92
6.3	SYNTHESE DE NOS PRECEDENTES ANALYSES	93
6.3.1	Préambule	93
6.3.2	Données pluviométriques	94
6.3.3	Données de températures.....	96
6.3.4	Données hydrométriques.....	97
6.3.5	Analyse des régimes	98
6.3.6	Instationnarité climatique.....	98
6.3.7	Méthodologie mise en œuvre.....	99
6.3.7.1	Méthode SCHADEX.....	99
6.3.7.2	Estimation des valeurs extrêmes de pluies sur deux périodes (1951-1970 et 1971-1994).....	100
6.3.7.3	Résultats du calage du modèle hydrologique et de la simulation SCHADEX ..	101
6.3.7.4	Construction des chroniques journalières des débits en continu de 20 000 années simulées	102
6.3.8	Vérification des débits simulés à la station de Bakel	104
6.3.9	Débits simulés à la station de Bakel avec le logiciel SIMULSEN, tenant compte de l'aménagement de Manantali	105
6.4	COMPLEMENTS HYDROLOGIQUES SPECIFIQUES.....	106
6.4.1	Préambule	106
6.4.2	Quantiles de débits maximaux annuels du Bafing	107
6.4.2.1	Station de Sokotoro (Bafing).....	107
6.4.2.2	Station de Balabori-Koukoutamba (Bafing)	107
6.4.2.3	Station de Boureya (Bafing).....	108
6.4.2.4	Station de Daka Saidou (Bafing)	108
6.4.3	Quantiles de débits maximaux annuels du Bakoye.....	109
6.4.3.1	Station de Toukoto (Bakoye)	109
6.4.3.2	Station de Oualia (Bakoye).....	109
6.4.3.3	Station de Siramakana (Baoulé, affluent du Bakoye)	110

6.4.4	Quantiles de débits maximaux annuels de la Falémé	110
6.4.4.1	Station de Moussala (Falémé)	110
6.4.4.2	Station de Gourbassi (Falémé)	111
6.4.4.3	Station de Kidira (Falémé).....	111
6.4.5	Quantiles de débits maximaux annuels du Sénégal à Bakel (rappel).....	112
6.5	EFFETS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	112
6.5.1	Objectif et méthode	112
6.5.2	Étape 1 : Synthèse bibliographique des études de référence.....	113
6.5.3	Étape 2 : Extraction des projections climatiques issues de 2 scénarios d'émission de gaz à effet de serre.....	113
6.5.4	Étape 3 : Sélection des modèles climatiques	114
6.5.5	Étape 4 : Forçage des variables pluies et ETP des modèles hydrologiques MORDOR par la méthode des anomalies moyennes.....	115
6.5.6	Étape 5 : Analyse et interprétation des résultats.....	116
7	RISQUES LIES A LA DEFAILLANCE DES BARRAGES	117
7.1	PREAMBULE	117
7.2	LES BARRAGES EN REMBLAI	118
7.2.1	Scénarios de rupture — barrages en remblai (hors barrages en enrochements).....	118
7.2.1.1	Sollicitations pouvant entraîner la rupture	118
7.2.1.2	Mécanismes de rupture.....	118
7.2.1.3	Scénarios de rupture.....	118
7.2.2	Détermination de l'hydrogramme de rupture — Barrages en remblais.....	119
7.2.2.1	Généralités	119
7.2.2.2	Méthodologie pour la détermination de l'hydrogramme de rupture	119
7.3	BARRAGES EN BETON	120
7.3.1	Sollicitations pouvant entraîner la rupture	120
7.3.2	Mécanismes de rupture.....	120
7.3.3	Dimensions de la brèche	120
7.3.4	Scénarios de rupture	120
7.3.5	Hydrogramme de rupture	121
7.4	AVIS SUR CRUES DE PROJET DES BARRAGES	122
7.5	APPLICATION DE LA METHODE AUX BARRAGES DU BFS	123
7.5.1	Préambule	123
7.5.2	Temps de rupture.....	123
7.5.3	Dimensions de la brèche.....	124
7.5.4	Débits de pointe.....	124
7.5.5	Synthèse des résultats.....	126
7.5.5.1	Scenarii retenus.....	126
7.5.5.2	Synthèse des caractéristiques des ruptures	127
8	ANALYSE HYDRAULIQUE	128
8.1	OBJECTIFS PRINCIPAUX	128
8.2	DETERMINATION DES ZONES INONDABLES DU FLEUVE SENEGAL	128
8.2.1	Préambule	128
8.2.2	Téledétection par imagerie satellitaire (aval Bakel).....	130
8.2.2.1	Choix des épisodes de crue.....	130
8.2.2.2	Crue de 1988.....	131

8.2.2.3	Crue de 1999.....	132
8.2.2.4	Crue de 2007.....	133
8.2.2.5	Crue de 2012.....	134
8.2.2.6	Crue de 2015.....	135
8.2.2.7	Comparaison des zones inondées définies par imagerie satellitaire.....	136
8.2.3	Traitement des bases de données cartographiques « Global Surface Water » (aval Bakel).....	137
8.2.3.1	Préambule	137
8.2.3.2	Définition des zones inondées pour plusieurs gammes de débits.....	138
8.2.4	Modélisation hydraulique	140
8.2.4.1	Préambule	140
8.2.4.2	Données topographiques exploitées.....	142
8.2.4.3	Validation de la pertinence du modèle hydraulique en cotes atteintes.....	143
8.2.4.4	Simulation des crues de période de retour 100, 1 000 et 10 000 ans.....	145
8.2.5	Synthèse finale des zones inondées	146
8.3	CRITIQUE DES COURBES DE TARAGE	148
8.3.1	Préambule	148
8.3.2	Synthèse de la critique des courbes de tarage.....	150
8.4	COTES SIMULEES A L'AVAL DE BAKEL AVEC LE LOGICIEL PROPAVAL EN TENANT COMPTE DES AMENAGEMENTS DE MANANTALI ET DIAMA	151
8.4.1	Présentation de la méthode.....	151
8.4.2	Résultats.....	152
8.5	SYNTHESE RELATIVE AUX INCIDENCES DES TEMPETES.....	153
8.5.1	Objectifs de l'étude et méthodologie	153
8.5.2	Estimation des niveaux maximaux liés aux tempêtes	153
8.5.3	Tests de l'impact de surcotes maritimes sur les niveaux d'inondation du delta du fleuve Sénégal.....	154
8.6	MODELES HYDRAULIQUES SPECIFIQUES POUR LES ONDES DE RUPTURE	155
8.6.1	Rappel des scenarii d'ondes de rupture retenus.....	155
8.6.2	Présentation des différents modèles mis en œuvre	156
8.6.3	Principales conclusions liées à la propagation des ondes de rupture	158
9	VULNERABILITE DES ENJEUX ET CAPACITE DE RESILIENCE	160
9.1	PRINCIPE	160
9.2	EXPLOITATION DES DONNEES EXISTANTES.....	161
9.3	TRAITEMENT D'IMAGES SATELLITE	162
9.4	VISITES DE TERRAIN	163
9.5	RENDUS	165
10	ACTUALISATION DES PLANS D'ALERTE	166
10.1	PREAMBULE	166
10.2	MISE A JOUR DES PLANS.....	169
10.3	CHOIX DES 100 SITES.....	170
10.3.1	Guinée	171
10.3.2	Mali.....	172
10.3.3	Mauritanie	173
10.3.4	Sénégal.....	174
10.3.5	Synthèse des sites retenus	175

10.4	CONSTRUCTION DES PLANS D'ALERTE INONDATION	176
10.4.1	Saisie des enjeux	176
10.4.2	Définition des zones inondables	176
10.4.3	Définition des seuils d'alerte	177
10.4.4	Précisions sur les centres d'accueil.....	184
10.4.5	Cartographies réalisées.....	186
10.4.6	Mise à jour de la base de données des PIC	187
11	PLAN D'ADAPTATION ET DE RESILIENCE DES POPULATIONS	188
11.1	PREAMBULE	188
11.2	MISE A JOUR DES SCENARIOS CATASTROPHIQUES	189
11.2.1	Communes situées en aval de grands barrages	189
11.2.2	Communes non exposées à une rupture de barrage.....	190
11.3	COMPLEMENTS SUR LES ZONES REFUGES	191
11.4	CONSTRUCTION DES PLANS DE RESILIENCE.....	192
12	PRECONISATIONS POUR LA MISE EN PLACE FUTURE D'UN SYSTEME D'ALERTE PRECOCE (SAP)	193
12.1	OBJECTIFS PRINCIPAUX DU FUTUR SAP	193
12.1.1	Généralités	193
12.1.2	Les principales tâches.....	194
12.1.3	Les diagnostics	194
12.1.4	La conception	195
12.1.5	La réalisation.....	195
12.1.6	L'exploitation — maintenance	195
12.1.7	Type de contractualisation	196
12.2	ASPECTS INSTITUTIONNELS.....	196
12.2.1	Diagnostic institutionnel	196
12.2.2	Présentation de la trame du modèle conceptuel	200
12.2.3	Proposition d'un modèle de gouvernance	200
12.2.4	Élaboration de la stratégie	201
12.2.5	Programme d'actions	201
12.2.6	Financement du SAP dans un objectif de pérennisation	201
12.3	LES DONNEES ALIMENTANT LE SAP	202
12.3.1	Référentiel des données sur l'eau	202
12.3.2	Réseau de mesures.....	204
12.3.3	Les données de connaissance du risque.....	208
12.3.4	La chaîne de diffusion de l'information et de remontée d'informations de terrain.....	208
12.3.5	Les données issues de modèles de prévision	209
12.3.6	Les données cartographiques	210
12.4	CONCEPTION ET DEVELOPPEMENT DES SERVICES WEB DU SAP	210
12.4.1	Préambule relatif à la plate-forme d'alertes	210
12.4.2	Diagnostic technique	210
12.4.2.1	État des lieux des équipements, base de données et moyens réseaux LAN et WAN des partenaires	210
12.4.2.2	Audit des moyens de communications, préconisations et coûts afférents ...	211
12.4.3	Conception de l'architecture du SAP et du réseau de communication.....	211
12.4.4	Chaîne de diffusion de l'alerte.....	214

12.4.4.1	Schéma de diffusion actuel de l'alerte et préconisations des précédents plans d'alerte.....	214
12.4.4.2	Fonctionnalités du SAP pour les alarmes et alertes	218
12.5	FUNCTIONALITES DU SAP ACCESSIBLE VIA PORTAIL WEB	219
12.5.1	Architecture	219
12.5.2	Portail web fonctions avancées.....	219
12.5.3	Ergonomie.....	220
12.5.4	Portail institutionnel - accès grand public	221
12.5.5	Géo-catalogue	221
12.6	INFRASTRUCTURE INFORMATIQUE	221
12.7	EXPLOITATION ET MAINTENANCE	222
12.8	ORDRES DE COUTS	224
ANNEXES.....	227
Annexe 1.	Base de données des ruptures de barrages	228
Annexe 2.	Mise à jour des contacts PIC de Guinée	231
Annexe 3.	Mise à jour des contacts PIC du Mali.....	232
Annexe 4.	Mise à jour des contacts PIC de Mauritanie	233
Annexe 5.	Mise à jour des contacts PIC du Sénégal.....	234
Annexe 6.	Plans d'alerte et de résilience de Guinée (7 zones d'alerte).....	235
Annexe 7.	Plans d'alerte et de résilience du Mali (29 zones d'alerte).....	236
Annexe 8.	Plans d'alerte et de résilience de Mauritanie (31 zones d'alerte).....	237
Annexe 9.	Plans d'alerte et de résilience du Sénégal (33 zones d'alerte)	238
Annexe 10.	Comptes-rendus des ateliers locaux, nationaux et régionaux.....	239

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

ADRS	Agence de Développement Rural de la vallée du fleuve Sénégal
BDD	Base De Données
BFS	Bassin du Fleuve Sénégal
DGPC	Direction Générale de la Protection Civile
GEV	Generalized Extremes Values
GRADEX	GRAdient des valeurs EXtrêmes
IGN	Institut Géographique National
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
MEWP	Multi Exponential Weather Pattern
Mm ³	Million de m ³
MW	Méga Watt
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OMVS	Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
PIC	Poste d'Information sur les Crues
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
SAP	Système d'Alerte Précoce
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SEMAF	Société d'Exploitation de Manantali et Félou
SCHADEx	Simulation Climato-Hydrologique pour l'Appréciation des Débits Extrêmes
SOGED	Société de Gestion et d'Exploitation de Diama
SOGEM	Société de Gestion de l'Énergie de Manantali
SOGENAV	Société de Gestion et d'Exploitation de la Navigation
SOGEOH	Société de Gestion de l'Énergie des Ouvrages du Haut-bassin guinéen
SONADER	Société Nationale pour le Développement Rural
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
VFS	Vallée du Fleuve Sénégal

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte du bassin versant.....	18
Figure 2 : Régime naturel du fleuve Sénégal	19
Figure 3 : Le fleuve Sénégal	19
Figure 4 : Le barrage de Diama	20
Figure 5 : Les endiguements de Diama à Rosso	21
Figure 6 : Le barrage de Manantali	22
Figure 7 : Points de calculs des débits pour différentes périodes de retour	25
Figure 8 : Extrait de la synthèse des zones inondées pour différents débits à l'aval de Bakel.....	28
Figure 9 : Extrait cartographique du plan d'alerte inondation de la commune de Richard Toll (Sénégal)	29
Figure 10 : Exemple du plan d'alerte inondation pour la commune de Médine (Mali).....	31
Figure 11 : Exemple du plan de résilience sur la commune de Soukoutalé (Mali).....	32
Figure 12 : Exemple d'une planche du plan d'alerte existant	37
Figure 13 : Schéma de circulation de l'annonce des crues pour la moyenne et la basse vallée	38
Figure 14 : Synoptique des barrages existants et projetés	41
Figure 15 : Plan de situation des barrages existants et projetés	42
Figure 16 : Vue en plan du barrage de Manantali.....	43
Figure 17 : Aperçus de l'ouvrage en cours de réalisation.....	43
Figure 18 : Plan schématique du barrage de Manantali	45
Figure 19 : Vue d'ensemble de l'ouvrage vu d'aval.....	45
Figure 20 : Photos du barrage de Manantali.....	46
Figure 21 : Contexte géologique du barrage de Manantali.....	46
Figure 22 : Courbe HSV de la retenue de Manantali.....	47
Figure 23 : Vue générale du barrage vers la rive gauche aval	47
Figure 24 : Profils type du barrage.....	48
Figure 25 : Ouvrages hydrauliques associés - Barrage de Manantali.....	49
Figure 26 : Lois de débitance des évacuateurs de crue - Barrage de Manantali	50
Figure 27 : Vue de l'usine hydroélectrique implantée au pied aval rive droite du barrage de Manantali.....	51
Figure 28 : Hydrogramme minimal de crue nécessaire à Bakel pour permettre d'irriguer en moyenne 50 000 hectares de cultures de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal (Source : POGR, 2002).....	52
Figure 29 : Plan de localisation - barrage de Diama.....	54
Figure 30 : Vue en plan - barrage de Diama.....	54
Figure 31 : Extraits de plans du barrage de Diama (coupe passe vannée).....	55
Figure 32 : Extraits de plans du barrage de Diama (élevations amont et aval).....	56
Figure 33 : Vue d'ensemble du barrage de Diama prise dans l'axe de la route qui franchit l'ensemble des ouvrages	58
Figure 34 : Autre vue d'ensemble de l'ouvrage depuis la rive droite aval. Seuls émergent de l'horizon la tour de contrôle et le portique de manœuvre des batardeaux	58
Figure 35 : Vue générale du barrage mobile prise dans l'axe de son chemin de roulement amont. À l'horizon : la Mauritanie	59
Figure 36 : Détails des organes hydromécaniques du barrage de Diama	60
Figure 37 : Vue détaillée de la porte busquée amont (photo prise vers l'amont)	61
Figure 38 : Vue générale du sas de l'écluse du barrage de Diama en direction de l'aval.....	61
Figure 39 : La porte busquée amont et le pont levant franchissant l'écluse, en position baissée en levée	62
Figure 40 : Le chenal d'approche de l'écluse coté fluvial avec le mur guideau soutenant le musoir à gauche et la lisse de guidage des bateaux à droite	62
Figure 41 : Équipements et infrastructures connexes.....	62
Figure 42 : Les endiguements de Diama à Rosso	63
Figure 43 : Photos du barrage de Félou	65
Figure 44 : Vues en plan du barrage de Félou.....	67
Figure 45 : Barrage de Félou (ouvrage de tête).....	68
Figure 46 : Barrage de Félou (usine).....	68
Figure 47 : Photos du barrage de Fom-Gleïta.....	69
Figure 48 : Vue 3D du barrage de Fom-Gleïta.....	70
Figure 49 : Illustration 3D du barrage de Balassa.....	71

Figure 50 : Retenue du barrage de Balassa	73
Figure 51 : Vue en plan du barrage de Balassa.....	74
Figure 52 : Coupe-type aile en remblai du barrage de Balassa.....	74
Figure 53 : Coupe-type évacuateur de crue du barrage de Balassa.....	75
Figure 54 : Coupe-type ouvrage de prises usinières du barrage de Balassa.....	75
Figure 55 : Retenue du barrage de Koukoutamba	76
Figure 56 : Vues en plan du barrage de Koukoutamba.....	78
Figure 57 : Coupe-type évacuateur de crue du barrage de Koukoutamba	79
Figure 58 : Coupe-type barrage BCR de Koukoutamba.....	79
Figure 59 : Coupe-type digue en enrochement RG de Koukoutamba	80
Figure 60 : Coupe-type prises usinières du barrage de Koukoutamba	80
Figure 61 : Retenue du barrage de Boureya.....	81
Figure 62 : Vue en plan du barrage de Boureya.....	83
Figure 63 : Coupe-type aile en terre du barrage de Boureya.....	83
Figure 64 : Coupe-type plot de raccordement RG du barrage de Boureya	84
Figure 65 : Coupe-type plot de raccordement RD du barrage de Boureya	84
Figure 66 : Evacuateur et vidange de fond du barrage de Boureya.....	85
Figure 67 : Prise d'eau du barrage de Boureya.....	85
Figure 68 : Illustration du barrage projeté de Gouina	86
Figure 69 : Photo des travaux du barrage de Gouina.....	86
Figure 70 : Illustration 3D du barrage de Gourbassi.....	88
Figure 71 : Retenue du barrage de Gourbassi.....	89
Figure 72 : Vues en plan du barrage de Gourbassi.....	91
Figure 73 : Schéma des différents affluents du fleuve Sénégal.....	93
Figure 74 : Pourcentage de stations enregistrant une année complète sur la période 1901-2015.....	94
Figure 75 : Carte de localisation des postes pluviométriques et des bassins versants étudiés.....	95
Figure 76 : Méthode pour la construction des grilles de pluie journalière.....	95
Figure 77 : Température moyenne mensuelle (°c).....	96
Figure 78 : Carte de localisation des stations hydrométriques (réalisation : O. Fossati; fond de carte : Boyer et al, 2006).....	97
Figure 79 : Ecart (en rouge) pour chaque année par rapport à la pluie moyenne annuelle sur la période 1951-1994.....	98
Figure 80 : Distribution des pluies journalières spatiales à Manantali sur la période 1951-1970 (à gauche) et 1971-1994 (à droite).....	100
Figure 81 : Distributions des débits moyens en 24 h (non centrés) du bassin versant du Bafing à Manantali pour les périodes 1951-1970 (à gauche) et 1971-1994 (à droite)	101
Figure 82 : Pour le Bafing à Manantali, hydrogrammes de crue au pas de temps journalier sélectionnés (à gauche) puis adimensionnés et centrés, sans le débit de base (à droite).....	102
Figure 83 : Schéma expliquant la méthode développée pour construire des chroniques journalières de débit sur les 3 cours d'eau étudiés.....	103
Figure 84 : Distribution des débits journaliers maximaux annuels Bakel (m ³ /s) - régime naturel (S=271 000 km ²).....	104
Figure 85 : Distribution des débits journaliers maximaux annuels à Bakel (m ³ /s) - régime intégrant l'influence du barrage de Manantali (S=271 000 km ²) [Scenarii M et N et débits observés].	105
Figure 86 : Points de calculs des débits pour différentes périodes de retour.....	106
Figure 87 : Ajustements de débits au droit de Sokotoro (Bafing).....	107
Figure 88 : Ajustements de débits au droit de Balabori-Koukoutamba (Bafing)	107
Figure 89 : Ajustements de débits au droit de Boureya (Bafing).....	108
Figure 90 : Ajustements de débits au droit de Daka Saidou (Bafing).....	108
Figure 91 : Ajustements de débits au droit de Toukoto (Bakoye)	109
Figure 92 : Ajustements de débits au droit de Oualia (Bakoye).....	109
Figure 93 : Ajustements de débits au droit de Siramakana (Baoulé, aff. Bakoye).....	110
Figure 94 : Ajustements de débits au droit de Moussala (Falémé).....	110
Figure 95 : Ajustements de débits au droit de Gourbassi (Falémé).....	111
Figure 96 : Ajustements de débits au droit de Kidira (Falémé).....	111
Figure 97 : Ajustements de débits au droit de Bakel (Sénégal).....	112
Figure 98 : Comparaisons des moyennes de précipitations mensuelles (mm) des observations et des résultats de modèles climatiques sur la période historique de 1986 à 2005 sur le bassin du Bafing.....	114
Figure 99 : Comparaisons des moyennes de températures mensuelles (°C) des observations et des résultats de modèles climatiques sur la période historique de 1986 à 2005 sur le bassin du Bafing.....	114
Figure 100 : Anomalies sur les pluies (mm) - Modèle gfdl_cm3 - Scénario 2.6 et 8.5 pour la période 2080-2099 - Bassin du Bafing (coordonnées du pixel central : X=10,42, Y=10,42).....	115

Figure 101 : Anomalies sur les températures (°C) - Modèle gfdl_cm3 - Scénarios 2.6 et 8.5 pour la période 2080-2099 - Bassin du Bafing (coordonnées du pixel central : X=10,42. Y=10,42).....	115
Figure 102 : Schéma de la chaine de calcul pour la simulation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements du Bafing.....	116
Figure 103 : 22 cas étudiés par Froehlich.....	125
Figure 104 : Zone de définition des zones inondables.....	128
Figure 105 : Exemples d'images satellite exploitées pour la cartographie de la zone inondée (1988).....	131
Figure 106 : Zone inondée lors de la crue de 1988 (définie par imagerie satellite).....	131
Figure 107 : Exemples d'images satellite exploitées pour la cartographie de la zone inondée (1999).....	132
Figure 108 : Zone inondée lors de la crue de 1999 (définie par imagerie satellite).....	132
Figure 109 : Exemples d'images satellite exploitées pour la cartographie de la zone inondée (2007).....	133
Figure 110 : Zone inondée lors de la crue de 2007 (définie par imagerie satellite).....	133
Figure 111 : Exemples d'images satellite exploitées pour la cartographie de la zone inondée (2012).....	134
Figure 112 : Zone inondée lors de la crue de 2012 (définie par imagerie satellite).....	134
Figure 113 : Exemples d'images satellite exploitées pour la cartographie de la zone inondée (2015).....	135
Figure 114 : Zone inondée lors de la crue de 2015 (définie par imagerie satellite).....	135
Figure 115 : Comparaison des zones inondées définies par imagerie satellitaire.....	136
Figure 116 : Enveloppe des zones inondées « Global Surface Water » sur la période 1984-2018.....	137
Figure 117 : Zones inondées pour différentes gammes de débits à partir des données GSW (exemple sur le tronçon Podor-Boghé).....	139
Figure 118 : Emprise des modèles hydrauliques mis en œuvre.....	140
Figure 119 : Modèle hydraulique amont.....	141
Figure 120 : Modèle hydraulique aval.....	141
Figure 121 : Modèle Numérique de Terrain exploité.....	142
Figure 122 : Hydrogrammes observés à Bakel en 1906 et 1999.....	143
Figure 123 : Profils en long des crues de 1906 et 1999.....	144
Figure 124 : Hydrogrammes synthétiques de crue de période de retour 100, 1 000 et 10 000 ans à Bakel.....	145
Figure 125 : Profils en long des crues de 1999 et des crues de période de retour 100, 1000 et 10 000 ans.....	145
Figure 126 : Extrait de la zone inondée par l'hydrogramme synthétique 10 000 ans à Bakel.....	146
Figure 127 : Extrait de la synthèse des zones inondées pour différents débits à l'aval de Bakel.....	147
Figure 128 : Extrait de la synthèse des zones inondées pour différents débits à l'amont de Bakel.....	147
Figure 129 : Carte de localisation des stations hydrométriques (réalisation : O. Fossati; fond de carte : Boyer et al, 2006).....	148
Figure 130 : Incidence de la surcote en mer sur les niveaux en crue (crue type 1999).....	154
Figure 131 : Emprise du modèle hydraulique construit pour la rupture des barrages de Manantali et Fougleita.....	156
Figure 132 : Emprise du modèle hydraulique construit pour la rupture du barrage de Gourbassi.....	156
Figure 133 : Emprise du modèle hydraulique construit pour les ruptures des barrages de Balassa, Koukoutamba et Boureya.....	157
Figure 134 : Superposition des emprises des zones inondées pour les ruptures de barrages étudiées.....	158
Figure 135 : Illustration de la zone inondée par l'éventuelle rupture du barrage de Manantali au droit de Bakel et Podor.....	159
Figure 136 : Extrait cartographique du plan d'alerte de Tafacirga au Mali (source OMVS 2004).....	161
Figure 137 : Extrait cartographique du plan d'alerte de Tafacirga traité en 2020 (bleu : zone inondable pour une crue de 3 000 m ³ /s du Sénégal).....	161
Figure 138 : Extrait cartographique et position des lieux d'intérêt à Bakel (source Google).....	162
Figure 139 : Fiche type pour recensement des enjeux lors de la visite sur le terrain.....	164
Figure 140 : Extrait cartographique du plan d'alerte inondation de la commune de Richard Toll (Sénégal).....	165
Figure 141 : Planche d'un plan d'alerte au Mali [2006].....	166
Figure 142 : Implantation des précédentes zones d'alerte au Sénégal (mission 2005).....	168
Figure 143 : Implantation des précédentes zones d'alerte en Mauritanie (mission 2005).....	168
Figure 144 : Implantation des précédentes zones d'alerte au Mali (mission 2005).....	169
Figure 145 : Implantation des précédentes zones d'alerte sur le bassin versant du Sénégal en 2005.....	170
Figure 146 : Position des 7 nouvelles zones d'alerte retenues pour la Guinée.....	171
Figure 147 : Position des 29 zones d'alerte retenues pour le Mali.....	172
Figure 148 : Position des 31 zones d'alerte retenues pour la Mauritanie.....	173
Figure 149 : Position des 33 zones d'alerte retenues pour le Sénégal.....	174
Figure 150 : Exemple d'un choix de seuils (niveau 1 et niveau 2) pour la commune de Waniekori au Mali selon les différentes crues modélisées du Bakoye.....	178
Figure 151 : Exemple de représentation cartographique des zones inondables - exemple de la commune de Boghé (Mauritanie).....	178
Figure 152 : Carte des stations hydrométriques retenues pour calage des seuils d'alerte lors des plans réalisés en 2020.....	179

Figure 153 : Exemples de 2 échelles de risque (Mbouma au Sénégal et Dounet en Guinée).....	183
Figure 154 : Exemple du plan d'alerte inondation pour la commune de Médine (Mali).....	186
Figure 155 : Carte des barrages modélisés sur le bassin versant du fleuve Sénégal.....	189
Figure 156 : Extrait cartographique du plan de résilience de la commune de Boghé (Mauritanie).....	190
Figure 157 : Travail de cartographie des zones refuges (avant et après) et emprise de la zone inondée suite à l'éventuelle rupture du barrage de Manantali (cas de Bafoulabé).....	191
Figure 158 : Exemple du plan de résilience sur la commune de Soukoutalé (Mali).....	192
Figure 159 : Descriptif fonctionnel d'un système global d'alerte précoce.....	193
Figure 160 : Organigramme général de l'OMVS.....	196
Figure 161 : Carte de localisation des stations hydrométriques (réalisation : O. Fossati; fond de carte : Boyer et al, 2006).....	204
Figure 162 : Carte de localisation des postes pluviométriques du BFS.....	205
Figure 163 : Planche d'un plan d'alerte au Sénégal [2020].....	208
Figure 164 : Schéma de circulation de l'annonce des crues pour la haute vallée.....	215
Figure 165 : Schéma de circulation de l'annonce des crues pour la moyenne et la basse vallée.....	217

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats des quantiles de débits moyens journaliers - SIMULSEN - SCHADEX (m^3/s) - régimes naturel et influencé par le barrage de Manantali.....	25
Tableau 2 : Synthèse des scénarii de ruptures retenus.....	26
Tableau 3 : Niveaux IGN [cm] associés à différentes périodes de retour pour les stations situées à l'aval de Bakel.....	28
Tableau 4 : Tableau des 100 zones d'alerte retenues dans le cadre du scénario n°2.....	30
Tableau 5 : Barrages projetés de 3 ^{ème} génération sur le bassin du fleuve Sénégal (source SDAGE).....	40
Tableau 6 : Fiche synoptique du barrage de Manantali.....	44
Tableau 7 : Fiche synoptique du barrage de Diama.....	55
Tableau 8 : Fiche synoptique du barrage de Félou.....	66
Tableau 9 : Fiche synoptique du barrage de Foum-Gleïta.....	70
Tableau 10 : Fiche synoptique du barrage de Balassa.....	72
Tableau 11 : Fiche synoptique du barrage de Koukoutamba.....	77
Tableau 12 : Fiche synoptique du barrage de Boureya.....	82
Tableau 13 : Fiche synoptique du barrage de Gouina.....	87
Tableau 14 : Fiche synoptique du barrage de Gourbassi.....	90
Tableau 15 : Débits des plus fortes crues à Bakel ($271\ 000\ km^2$) avant et après la mise en service du barrage de Manantali.....	97
Tableau 16 : Ecarts en pourcentage sur les variables pluies et écoulements moyens pour les 3 bassins versants entre la période globale de calage (1951-1994) et les sous périodes 1951-1970 et 1971-1994.....	99
Tableau 17 : Les quantiles de pluies de bassins (mm/jour) aux différents temps de retour pour les deux sous périodes.....	100
Tableau 18 : Les quantiles de débits moyens journaliers (m^3/s) pour les 3 bassins versants et pour les deux sous-périodes.....	101
Tableau 19 : Résultats des quantiles de débits journaliers maximaux annuels - SIMULSEN - SCHADEX (m^3/s) - régime naturel.....	104
Tableau 20 : Résultats des quantiles de débits journaliers maximaux annuels à Bakel - SIMULSEN - SCHADEX (m^3/s) - régime naturel ($S=271\ 000\ km^2$).....	104
Tableau 21 : Résultats des quantiles de débits moyens journaliers - SIMULSEN - SCHADEX (m^3/s) - régimes naturel et influencé par le barrage de Manantali.....	105
Tableau 22 : Quantiles de débits - Sokotoro (Bafing).....	107
Tableau 23 : Quantiles de débits - Balabori-Koukoutamba (Bafing).....	107
Tableau 24 : Quantiles de débits - Boureya (Bafing).....	108
Tableau 25 : Quantiles de débits - Daka Saidou (Bafing).....	108
Tableau 26 : Quantiles de débits - Toukoto (Bakoye).....	109
Tableau 27 : Quantiles de débits - Oualia (Bakoye).....	109
Tableau 28 : Quantiles de débits - Siramakana (Baoulé, aff. Bakoye).....	110
Tableau 29 : Quantiles de débits - Moussala (Falémé).....	110
Tableau 30 : Quantiles de débits - Gourbassi (Falémé).....	111
Tableau 31 : Quantiles de débits - Kidira (Falémé).....	111
Tableau 32 : Quantiles de débits - Bakel (Sénégal).....	112
Tableau 33 : Caractéristiques principales des scénarios RCP du GIEC (source : Moss & al., 2010).....	113

Tableau 34 : Liste des modèles climatiques pour lesquels des simulations ont été extraites.....	113
Tableau 35 : Mécanismes de rupture - Barrages en remblai	118
Tableau 36 : Comparaison des crues de projet des barrages (existants et projetés) avec les débits exceptionnels estimés dans le cadre de l'étude.....	122
Tableau 37 : Synthèse des scénarii de ruptures retenus.....	127
Tableau 38 : Débits des plus fortes crues à Bakel (271 000 km ²) avant et après la mise en service du barrage de Manantali.....	130
Tableau 39 : Synthèse de l'analyse critique des courbes de tarage	150
Tableau 40 : Niveaux IGN [cm] associés à différentes périodes de retour pour les stations situées à l'aval de Bakel.....	152
Tableau 41 : Cotes de référence des enregistrements homogénéisés.....	152
Tableau 42 : Niveau de surcote au large, set-up par les vagues au contour de 0 m MSL et surcote totale pour les surcotes extrêmes avec une période de retour variant entre 1 an et 100 ans	153
Tableau 43 : Synthèse des scénarii de ruptures retenus.....	155
Tableau 44 : Tableau détaillé des 90 zones d'alerte retenues dans le cadre de la précédente mission Coyne et Bellier - CNR (2005).....	167
Tableau 45 : Tableau des 100 zones d'alerte retenues dans le cadre du scénario n°2	175
Tableau 46 : Tableau de synthèse de la répartition des plans d'alerte par pays	175
Tableau 47 : Tableau de correspondance débits-hauteurs aux stations hydrométriques retenues pour le Sénégal aval.....	180
Tableau 48 : Tableau de correspondance débits-hauteurs aux stations hydrométriques retenues pour le Sénégal amont, Bafing, Bakoye et Falémé.....	181
Tableau 49 : Temps de transfert entre les principales stations de référence pour le Sénégal amont, Bafing, Bakoye et Falémé (Amont de Bakel).....	182
Tableau 50 : Tableau des 44 communes sans centre d'accueil identifié.....	184
Tableau 51 : Tableau des 29 communes dotées de centres d'accueil non exposés aux risques (crue et rupture de barrage)	185
Tableau 52 : Avantages/inconvénients des différentes solutions de remontée d'informations de terrain ..	209



1 OBJECTIFS DE LA MISSION

L'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) a été créée le 11 mars 1972 par le Mali, la Mauritanie et le Sénégal, qui ont été rejoints le 17 mars 2006 par la Guinée. Elle a pour objectif stratégique la mobilisation et l'exploitation des ressources en eau du bassin du fleuve Sénégal afin de promouvoir le développement économique et social des populations des pays membres.

Les États qui composent l'OMVS comme partout ailleurs font face à un certain nombre de risques de catastrophes naturelles, en particulier des catastrophes météorologiques et hydrologiques tels que les sécheresses, les inondations, les tempêtes, etc.

L'ampleur de la vulnérabilité et de l'exposition aux aléas climatiques ainsi que les pertes résultant de catastrophes pourraient continuer à augmenter au cours des prochaines décennies. Les inondations sont parmi les principaux phénomènes liés aux conditions météorologiques enregistrées pouvant entraîner des dégâts importants (matériels et humains).

C'est pourquoi, pour faire face à ces aléas, l'OMVS s'est attelée à la construction des grands ouvrages structurants. Toutefois, certains risques de crues naturelles restent importants et d'autres risques techniques (défaillance des ouvrages, ruptures...) peuvent s'ajouter aux crues naturelles.

C'est dans ce contexte que, le Haut-Commissariat de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) s'est proposé de mettre en place un plan d'alerte dans le bassin du fleuve Sénégal.

Une première phase de l'étude d'un plan d'alerte, qui s'est déroulée entre 1992 et 1997, avait pour objectifs la proposition d'un système d'annonce de crues dans toute la vallée du fleuve Sénégal et d'un plan d'alerte proprement dit dans deux zones test (Mahina-Bafoulabé et Podor-lexeiba).

Une seconde phase de l'étude du plan d'alerte a été réalisée en 2005 et s'appuyait sur les leçons tirées de la première phase. Cette étude concernait la zone en aval du barrage de Manantali et a visé tant l'amélioration du système d'annonce des crues que les mesures au niveau local.

L'objet du présent projet est l'actualisation du plan d'alerte dans le bassin du fleuve Sénégal sur la base d'analyses :

- Hydrologiques permettant d'élaborer un référentiel de débits pour différentes périodes de retour en divers points stratégiques du bassin versant en intégrant les effets potentiels du changement climatique,
- Liées à la vulnérabilité des barrages (en lien ou non avec l'hydrologie),
- Hydrauliques afin d'être en mesure d'associer des zones inondées aux possibilités de catastrophes étudiées et de mieux connaître la propagation des hydrogrammes naturels ou liés à des défaillances techniques,
- Liées à la vulnérabilité des vallées à l'aval des différents barrages,
- ...

L'actualisation du plan d'alerte s'est appuyée sur l'analyse d'une centaine de zones d'alerte et a été suivie par des préconisations techniques liées à la future mise en place d'un Système d'Alerte Précoce (SAP) pour le bassin.

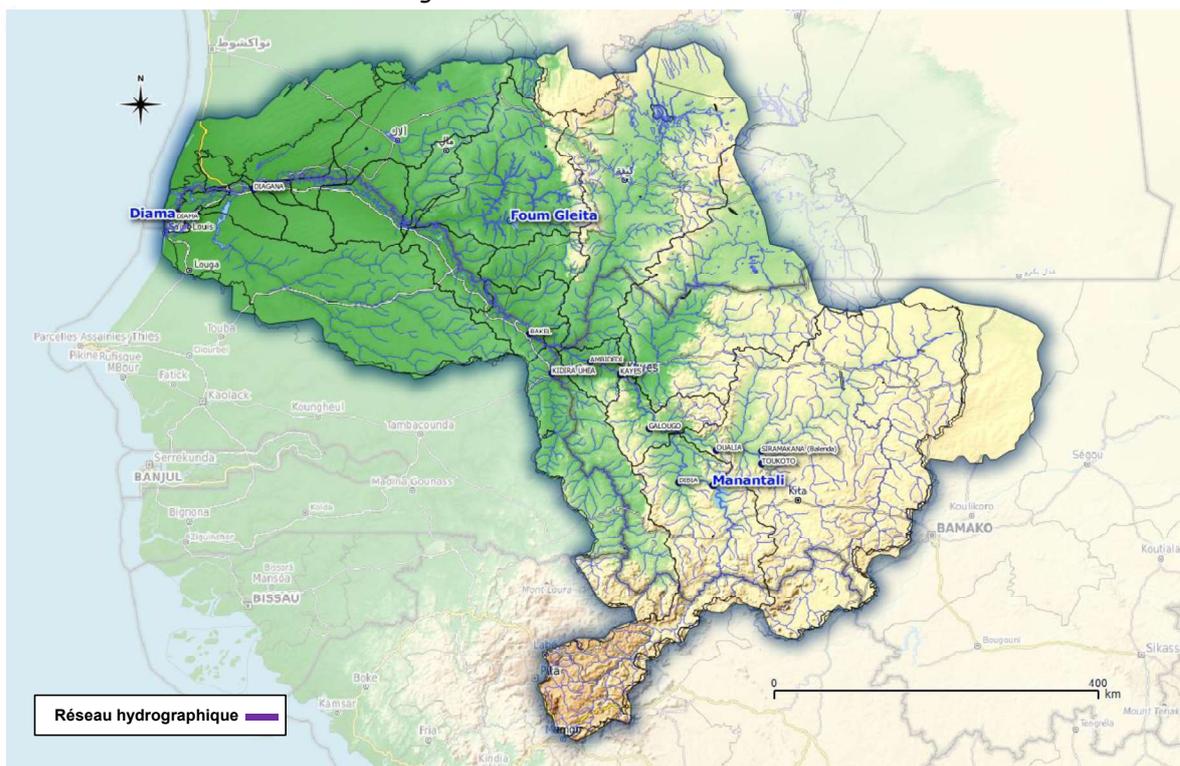


2 CONTEXTE GÉNÉRAL

2.1 REGIME HYDROLOGIQUE NATUREL

Le Sénégal est un fleuve d'Afrique de l'ouest de 1800 km de long, dont le bassin versant peuplé d'environ 5 à 6 millions d'habitants qui recouvre, sur approximativement 425 000 km²^[1], une partie de la Guinée, du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal.

Figure 1 : Carte du bassin versant

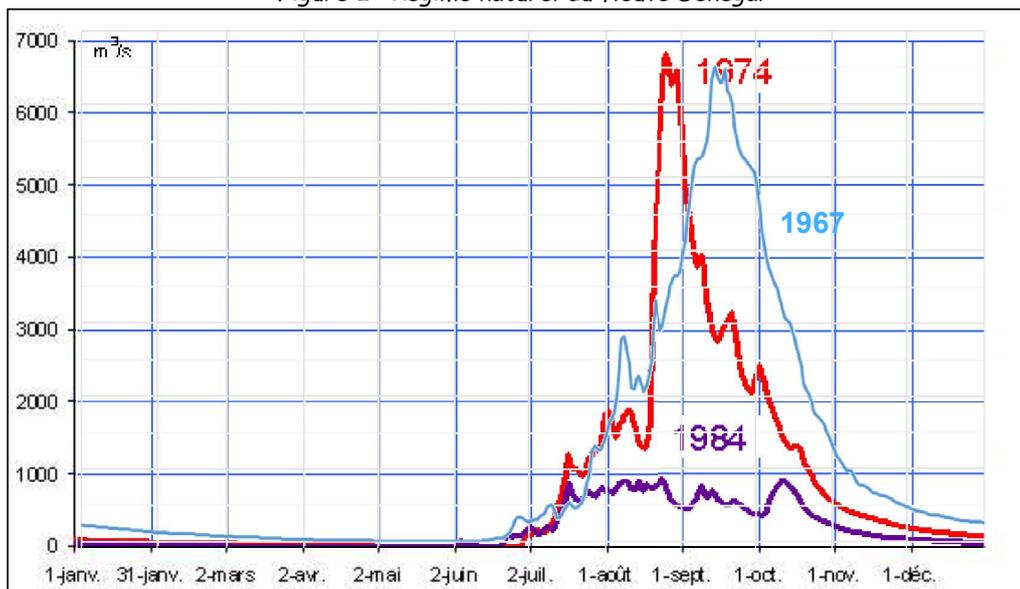


Son régime naturel à forte variabilité interannuelle est caractérisé par une période de crue s'étalant de juillet à octobre suivie d'un tarissement progressif aboutissant certaines années à un quasi-arrêt de l'écoulement vers les mois de mai ou juin sur certains biefs.

¹ Surface issue du bassin versant officiel fourni par l'OMVS.



Figure 2 : Régime naturel du fleuve Sénégal



La majeure partie de l'écoulement du Sénégal provient de son bassin amont drainé par le Bafing (entre 40 et 60% des apports), le Bakoye et la Falémé qui prennent leur source dans le massif bien arrosé du Fouta Djallon (2000 mm/an). A partir de Bakel situé à 794 km de l'embouchure, le fleuve qui ne reçoit plus que des apports sporadiques s'écoule dans une vallée très plate (pente moyenne de ligne d'eau en étiage : 0,001 %), où la crue amortie peut inonder le lit majeur sur plusieurs centaines de milliers d'hectares.

Figure 3 : Le fleuve Sénégal



Observé depuis un siècle à plusieurs stations hydrométriques, le Sénégal montre une baisse notable de son hydraulité naturelle depuis le début des années 70, comme plusieurs autres cours d'eau d'Afrique de l'ouest. Une légère reprise s'est manifestée toutefois vers les années 2000.



2.2 GRANDS AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

Dans le but de favoriser le développement de la région, les états du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal ont créé l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), organisme chargé de promouvoir une gestion intégrée de la ressource en eau sur le bassin. Sous l'impulsion de l'OMVS, deux grands barrages ont à ce jour été réalisés : Diama et Manantali dits ouvrages de première génération dont une présentation succincte est réalisée dans les chapitres suivants. Les autres ouvrages importants à noter sont les endiguements de Diama à Rosso en rives droite et gauche.

2.2.1 Barrage de Diama

Implanté tout près de l'embouchure du fleuve, ce barrage mis en service en 1986 a pour but d'empêcher la remontée des eaux salées pendant l'étiage. Associé aux endiguements du fleuve en rive droite et rive gauche, il permet en outre de maintenir le niveau du fleuve Sénégal aux cotes les plus élevées possibles en période d'étiage suivant les consignes de gestion de la retenue du barrage de Diama. Ceci favorise le développement d'une agriculture par irrigation gravitaire dans le delta, et la disponibilité permanente d'eau douce pour l'alimentation des lacs de R'kiz et de Guiers.

L'eau stockée, douce en permanence, permet l'irrigation des périmètres en rive gauche et droite, l'approvisionnement en eau potable des populations, le développement de l'élevage, la protection de l'environnement et la conservation des zones humides, le développement des activités minières et la navigation. A la cote de + 2,5 m IGN (pour un volume de 580 millions de m³ environ), la surface potentielle irrigable à l'amont de la retenue est de 120 000 ha. L'ouverture d'une brèche dans la langue de Barbarie lors de la crue de 2003 a nécessité l'adaptation de son mode de gestion.

L'exploitation, l'entretien et le renouvellement du barrage de Diama et de ses ouvrages annexes et accessoires ainsi que la conception, la construction et le financement de nouveaux ouvrages sont confiés à la Société de Gestion et d'Exploitation de Diama (SOGED) suivant le contrat de concession et de délégation du service public de l'eau.

Figure 4 : Le barrage de Diama

