



HAUT COMMISSARIAT

Projet de gestion des ressources en eau et
de l'environnement du bassin du fleuve Sénégal
(GEF/BFS)

Cofinancement Royaume des Pays-Bas (TF N° 055192)
Volet 2 : GIRE et lutte contre la dégradation
des berges et l'érosion des sols.



Rapport d'analyse des options de protection des berges

Version finale- Mai 2008



Préparé par le Groupement BURGEAP/SEMIS – Mai 2008

Table des matières

I.	INTRODUCTION	5
II.	CADRE, CONTEXTE ET CONTENU DU PROJET.....	5
2.1	CADRE DU PROJET : PRESENTATION DES ACTIVITES DU VOLET 2.....	5
2.2	CONTEXTE DE MISE EN ŒUVRE DES ACTIVITES DU VOLET 2.....	6
III.	PRESENTATION DE LA ZONE D'INTERVENTION	7
3.1	LES BERGES DU FLEUVE A HAUTEUR DE KAYES	7
3.1.1	<i>La sous-zone de la Centrale EDM.....</i>	<i>8</i>
3.1.2	<i>La sous-zone du Pont sur le Fleuve Sénégal.....</i>	<i>9</i>
3.1.3	<i>La sous-zone des berges entre le pont et la Centrale.....</i>	<i>9</i>
3.2	LE BASSIN VERSANT DU PAPARAH	9
IV.	DEROULEMENT DE LA MISSION	10
4.1	MISSION D'IDENTIFICATION	10
4.1.1	<i>La première phase de la mission.....</i>	<i>10</i>
4.1.2	<i>La seconde phase de la mission.....</i>	<i>10</i>
4.1.3	<i>Activités et résultats.....</i>	<i>10</i>
4.2	ETUDES COMPLEMENTAIRES REALISEES.....	12
V.	PROBLEMES A RESOUDRE	12
5.1	CENTRALE EDM	12
5.2	CULEE GAUCHE DU PONT	13
5.3	BERGES RIVE GAUCHE.....	13
5.4	PERSPECTIVES	14
VI.	PRINCIPALES TECHNIQUES DE PROTECTION	15
6.1	TECHNIQUES LOURDES.....	15
6.1.1	<i>Principe.....</i>	<i>15</i>
6.1.2	<i>Matériaux utilisés</i>	<i>15</i>
6.1.3	<i>Autres types de confortement de berges</i>	<i>16</i>
6.1.4	<i>Avantages et inconvénients.....</i>	<i>17</i>
6.2	TECHNIQUES DOUCES	18
6.2.1	<i>Principes</i>	<i>18</i>
6.2.2	<i>Différents types de protection</i>	<i>18</i>
6.2.3	<i>Avantages et inconvénients du génie végétal.....</i>	<i>19</i>
VII.	ANALYSE SOMMAIRE DES OPTIONS	21
7.1	HYPOTHESES DE TRAVAIL ET DONNEES DE BASE	21
7.1.1	<i>Données hydrologiques.....</i>	<i>21</i>
7.1.2	<i>Données topographiques</i>	<i>21</i>
7.1.3	<i>Calage des cotes et hauteurs des ouvrages</i>	<i>22</i>
7.1.4	<i>Etudes des sols de fondation.....</i>	<i>22</i>
7.2	SOLUTIONS TECHNIQUES	22
7.2.1	<i>Typologie des ouvrages</i>	<i>22</i>
7.2.1.1	<i>Protection de la centrale EDM.....</i>	<i>23</i>
7.2.1.2	<i>Protection de la culée du pont sur le fleuve Sénégal</i>	<i>23</i>
7.2.1.3	<i>Protection des berges de la centrale au pont.....</i>	<i>23</i>
7.3	SPECIFICATIONS TECHNIQUES	24
7.3.1	<i>Ouvrages en béton armé</i>	<i>24</i>
7.3.1.1	<i>Principes de conception</i>	<i>24</i>
7.3.1.2	<i>Exécution des ouvrages en béton armé.....</i>	<i>26</i>
7.3.2	<i>Ouvrages en gabions.....</i>	<i>26</i>
7.3.2.1	<i>Principes de conception</i>	<i>26</i>
7.3.2.2	<i>Exécution des ouvrages en gabions.....</i>	<i>28</i>
7.3.3	<i>Ouvrages en remblai</i>	<i>30</i>
7.4	ANALYSE COMPAREE DES OPTIONS ET EVOLUTION DES COUTS	31
7.4.1	<i>Evolution des volumes en fonction de la hauteur de l'ouvrage</i>	<i>31</i>
7.4.1.1	<i>Ouvrages en béton armé.....</i>	<i>31</i>

7.4.1.2	<i>Ouvrage en gabion</i>	32
7.4.1.3	<i>Digue</i>	32
7.4.2	<i>Incidences sur les volumes de remblai à mettre en place</i>	33
7.4.3	<i>Comparaison des coûts</i>	33
7.4.3.1	<i>Détermination et structure des coûts moyens</i>	33
7.4.3.2	<i>Comparaison des coûts pour différentes options et variantes</i>	35
7.5	COMBINAISONS OPTIMALES	36
VIII.	RECOMMANDATIONS DE L'ASSISTANCE TECHNIQUE	37
8.1	ZONES PRIORITAIRES ET JUSTIFICATIONS.....	37
8.1.1	<i>Choix des zones prioritaires</i>	37
8.2	SOLUTIONS TECHNIQUES	39
8.2.1	<i>Choix basé sur le niveau d'investissement</i>	39
8.2.2	<i>Choix basé sur les autres critères</i>	40
8.3	PROCEDURE D'ELABORATION DU DOSSIER D'APPELS D'OFFRES.....	40
8.3.1	<i>La démarche globale</i>	40
8.3.2	<i>La prise en compte des études complémentaires</i>	41
8.3.3	<i>Planning d'exécution</i>	42
IX.	CONCLUSIONS	44

ANNEXES

1. Fiches descriptive des options et variantes
 - 1.1 Description
 - 1.2 Détails coûts principaux
 - 1.3 Schéma de l'option
2. Données topographiques des berges entre le pont et la centrale EDM

Table des tableaux, graphiques, photos et figures

Liste des tableaux

Tableau 1 : Activités du volet 2 GIRE et lutte contre l'érosion de sols et la dégradation des berges.....	7
Tableau 2 : Techniques lourdes de protection des berges	16
Tableau 3 : Détermination des prix unitaires moyens.....	34
Tableau 4 : Récapitulatif des coût des travaux par type, options et variantes.....	35
Tableau 5 : Combinaison d'options à mur unique.	36
Tableau 6 : Combinaison d'options de mur à 2 niveaux.....	36
Tableau 7 : Combinaison d'options de murs à 3 niveaux avec digue et remblai.	36
Tableau 8 : Combinaison d'options mixte de murs à 3 niveaux sur les berges et digue + mur et remblai....	36

Liste des graphiques

Graphique 1 : Courbe de tarage du fleuve Sénégal à hauteur de Kayes.....	21
Graphique 2 : Evolution de la section unitaire des murs de béton sur plusieurs niveaux	32
Graphique 3 : Investissement global pour les 3 sous-zones d'intervention	37
Graphique 4 : Investissement pour les 2 sous-zones prioritaires	38
Graphique 5 : Comparaison des coûts des ouvrages en béton et en gabion et hauteur optimale.....	40

Liste des photos et figures

Figure 1 : Image de la zone d'intervention.....	8
Figure 2 : Illustration des zones fragilisées	17
Figure 3 : Schéma de base de prédimensionnement d'un mur de soutènement en béton	25
Figure 4 : Profil type des ouvrages en gabion	27
Figure 5 : Photos 1 et 2 : Mur en gabion de la Mosquée de la Divinité à Dakar.	28
Figure 6 : Photos 3 : Mur de soutènement de la Porte du Millénaire à Dakar.....	28
Figure 7 : Illustration du Terramesh System	30
Figure 8 : Image de la zone aménagée sur les berges du Niger à Bamako.....	39

I. INTRODUCTION

Le présent rapport fait suite aux activités menées par le Groupement Burgeap /SEMIS chargé de l'Assistance Technique du programme du Cofinancement Pays-Bas du projet GEF de l'OMVS.

La mission effectuée au Mali fait suite aux ateliers de planification stratégique et opérationnel aux cours desquels, les acteurs des pays membres de l'OMVS à travers les Cellules Nationales, ont dégagé les actions jugées prioritaires.

Elle a consisté à mener des investigations sur le terrain dans le but d'identifier les travaux à réaliser dans le cadre du Volet 2 du programme de cofinancement consacré à la GIRE et à la lutte contre l'érosion des sols et la dégradation des berges.

Les résultats initialement attendus étaient : (i) les zones prioritaires des berges à protéger sont identifiées et leur choix validé par les acteurs nationaux, (ii) les données de base de l'élaboration des TDR de l'étude du bassin pilote du Papparrah sont collectées et (iii) les DAO d'étude du Papparrah et des travaux de protection des berges sont élaborés.

Au cours de la mission, il a été envisagé de procéder à une analyse de la faisabilité des options de travaux de protection pour opérer les meilleurs choix possibles tenant compte des contraintes budgétaires et des exigences des acteurs directement concernés. La restitution du présent rapport marquera définitivement le démarrage du processus de sélection des sites prioritaires et des options techniques, sur la base desquelles, le dossier d'appel d'offres sera élaboré.

Le rapport présente le cadre et le contexte de la mission après un bref rappel de la consistance du volet 2. Une description détaillée de la zone d'intervention est donnée avec une présentation des problèmes à résoudre et les solutions envisageables.

L'analyse comparée des différentes options techniques et variantes, basée essentiellement sur le coût de l'ouvrage principal est faite, avec une estimation des coûts unitaires tirée d'une analyse des offres et marchés de travaux similaires dans la sous-région. Enfin, un chapitre consacré aux recommandations de l'Assistance Technique vient clore le présent rapport qui porte en annexe, la description détaillée et l'illustration des différentes options et variantes.

Il est clair que le présent rapport, constitue en définitive une étude de faisabilité incluant des éléments d'un avant projet détaillé des travaux dont certains aspects seront finalisés lors de l'étude d'exécution intégrée au marché des travaux. Sur cette base, et après que les options seront prises, l'AT procédera à l'élaboration du DAO.

II. CADRE, CONTEXTE ET CONTENU DU PROJET

2.1 Cadre du projet : présentation des activités du volet 2

Le volet 2 intitulé GIRE et lutte contre l'érosion des sols et la dégradation des berges a été formulé sur la base de constats alarmants portant une érosion importante des berges du fleuve Sénégal et des sols dans les bassins versant situés dans la haute vallée.

Cette érosion affecte la stabilité des infrastructures situées le long des berges, particulièrement pour la ville de Kayes, le poste de transformation de l'énergie électrique de Manantali, desservant plusieurs localités.

Au niveau du lit du fleuve et dans les affluents, l'érosion des sols provoque une sédimentation perturbant leurs régimes. A l'intérieur des bassins, cette érosion provoque une forte réduction des surfaces cultivables et une perte de récoltes.

Sur la base de ces constats, un plan d'action pilote a été dressé, mettant en avant, la nécessité de mobiliser des financements importants et d'évaluer les impacts économiques, sociaux et environnementaux de la dégradation des berges et l'érosion des sols et mettre en place une approche institutionnelle axée autour de la création de comités de bassin et impliquant les acteurs dans le cadre de la GIRE.

Les enseignements tirés de la mise en œuvre de ce plan d'action permettront de définir des solutions pouvant favoriser un développement durable des communautés concernées.

Le plan d'action initialement défini s'articule autour des points suivants :

- Pour le plan d'action GIRE dans les affluents
 - Etude de faisabilité du projet pilote sur le bassin du Paparah ;
 - Développement du processus de mise en place des comités de bassin responsables pour la GIRE;
 - Mise en place d'un comité de bassin et des comités locaux de l'eau ;
 - Réalisation de travaux de remise en état et d'amélioration dans les affluents.
- Pour le plan d'action sur les berges du fleuve Sénégal
 - Etude hydrologique et économique détaillée pour trouver les causes de l'érosion des berges, les options de stabilisation des berges et pour estimer l'impact économique et social de l'érosion des berges.

Les ateliers de planification stratégique et opérationnelle des activités de l'Assistance Technique ont permis de redéfinir les priorités et de détailler les activités.

2.2 Contexte de mise en œuvre des activités du volet 2

■ Démarrage des activités de l'AT

L'équipe chargée de l'Assistance Technique du programme de cofinancement du GEF a été mise en place en octobre 2007. La présente mission se situe dans le cadre des activités préliminaires, durant la phase de démarrage des activités du programme.

■ Planification des activités et définition des priorités

Le démarrage des activités de l'Assistance Technique est effectif en octobre 2007. La tenue des ateliers de planification en février a constitué une étape décisive dans la maîtrise du calendrier opérationnel et la définition des activités et tâches.

A la suite de ces ateliers, les activités suivantes présentées selon la priorité définie par les acteurs nationaux, ont été finalement retenues pour le volet 2.

Site	Activités	Tâches
Berges du fleuve Sénégal à Kayes	Etudes de faisabilité des actions de lutte contre l'érosion des berges de Kayes	<ul style="list-style-type: none"> - Identification et sélection des sites. - Concertation avec les acteurs (commune, services techniques, population, CLC...).
	Mise en œuvre des aménagements et du suivi des travaux	<ul style="list-style-type: none"> - Constitution des DAO pour les entreprises Passation de marché. - Mobilisation de la population de Kayes Formation des acteurs aux techniques anti-érosives. - Contrôle et suivi des réalisations des travaux (berges).
	Mise en place de l'équipement des structures en charge de l'entretien	<ul style="list-style-type: none"> - Commande des équipements ; - Mise en place d'équipements pour l'entretien (<i>p.m. formation</i>).
Bassin du Paparah	Etude de faisabilité d'un projet pilote de lutte contre l'érosion des sols dans le bassin de Paparah	<ul style="list-style-type: none"> - Identification et sélection des sites - Concertation avec les acteurs (commune, services techniques, population, CLC...
	Mise en œuvre des aménagements et du suivi des travaux	<ul style="list-style-type: none"> - Constitution des DAO pour les entreprises Passation de marché. - Mobilisation de la population de Kayes et des villages riverains. - Formation des acteurs aux techniques anti-érosives. - Contrôle et suivi des réalisations des travaux.
	Mise en place de l'équipement des structures en charge de l'entretien	<ul style="list-style-type: none"> - Commande des équipements. - Mise en place d'équipements pour l'entretien (<i>p.m. formation</i>).

Tableau 1 : Activités du volet 2 GIRE et lutte contre l'érosion de sols et la dégradation des berges

III. PRESENTATION DE LA ZONE D'INTERVENTION

La zone d'intervention du projet GEF/BFS correspond (i) aux berges situées dans la rive gauche du fleuve Sénégal, dans la ville de Kayes et (ii) au bassin versant du Paparah localisé au sud de la ville de Kayes.

La zone d'étude considérée dans le présent rapport couvre les berges de la rive du fleuve Sénégal à Kayes situées entre le pont et la prise d'eau brute de la station de potabilisation.

3.1 Les berges du fleuve à hauteur de Kayes

Les berges sont limitées par le pont sur le fleuve Sénégal et l'entrée du Paparah située près de 150 m en amont de la Centrale EDM. Pour une protection plus globale des infrastructures stratégiques, il est envisagé d'étendre la zone d'intervention à la prise d'eau de la station de potabilisation des eaux de surface, située 500 m plus loin en amont.

L'extension de la zone d'intervention a l'avantage d'englober l'entrée du Paparah, ce qui permettrait une définition plus précise des solutions de protection et de lutte contre l'érosion et la sédimentation à la confluence Fleuve Sénégal-Paparah. La longueur totale des berges concernées par les travaux s'établit finalement à 2819 m environ (du pont à la prise d'eau brute de la station de potabilisation).

Cette zone d'intervention comprend 3 sous-zones, dont la problématique et les actions à envisager pourraient amener à procéder à la définition de l'ordre de priorité suivant :

1. la sous-zone de la Centrale EDM : ,
2. la sous-zone du pont sur le fleuve Sénégal
3. la sous-zone des berges entre le pont et la Centrale EDM,

La sous-zone des berges entre l'entrée du Paparah et la prise d'eau brute n'a pas été prise en compte dans le cadre de la présente étude. Son intégration au programme des travaux sera largement tributaire des reliquats de financement disponibles après le traitement des sous-zones critiques. La description de cette partie des berges reste similaire à celle des berges entre le pont et la centrale électrique.

La photo suivante illustre parfaitement l'étendue et la configuration de la zone d'intervention.

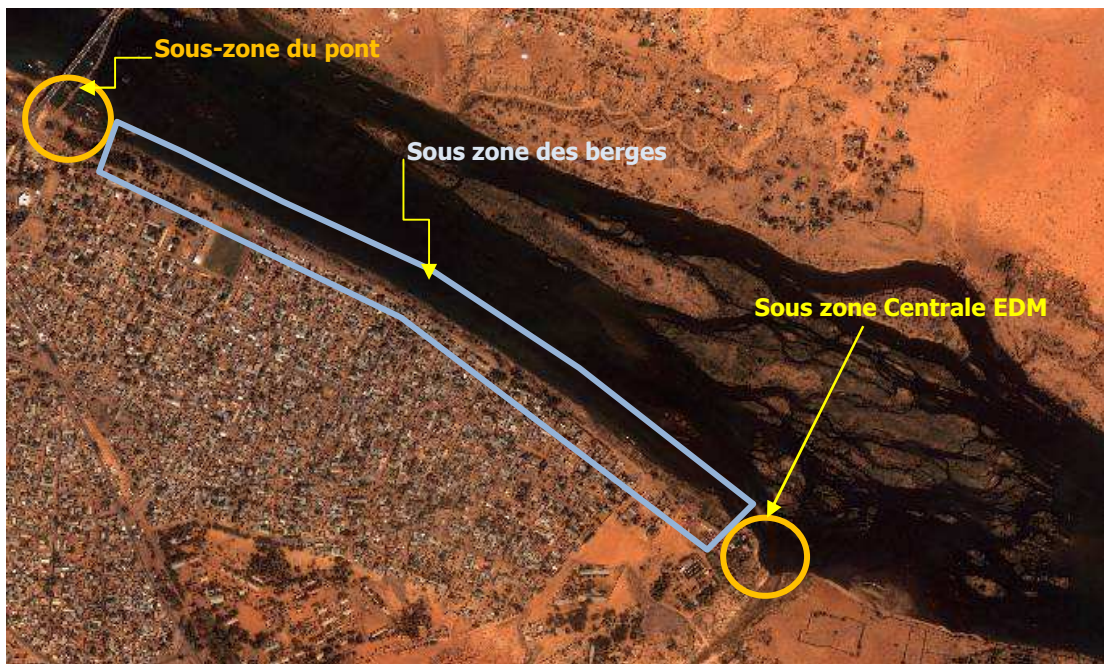


Figure 1 : Image de la zone d'intervention

3.1.1 La sous-zone de la Centrale EDM

Elle est subdivisée en 3 parties comprenant :

- les berges situées au droit du bâtiment principal de la Centrale sur une distance de 50 m,
- les berges qui se présentent sous forme d'une courbe entre le Paparah et la Centrale sur une distance de 102 m,
- et les berges entre le Paparah et la prise d'eau brute de la station de traitement sur une distance de 830 m.

Au total, la longueur de cette sous-zone est de 982 m incluant le lit du Paparah large de 135 m.

Les berges présentent dans cette sous-zone, une pente très forte. Entre la centrale et le Paparah, les parois des berges sont presque verticales.

3.1.2 La sous-zone du Pont sur le Fleuve Sénégal

La sous-zone du Pont part de la culée gauche du pont jusqu'au mur de protection existant, sur une distance de 144 m. Elle comprend la culée gauche du pont, le remblai de protection, le débouché du collecteur des eaux usées, le mur de soutènement du remblai sur lequel se situe l'espace boisé situé entre cet ouvrage et le collecteur d'eaux usées.

Cette sous-zone comprend l'ancien ouvrage de franchissement du fleuve, actuellement fréquenté par les populations qui y mènent diverses activités : transport fluvial, nettoyage de véhicules qui accèdent par la rive droite, activités domestiques, baignades, extraction de sable.

Sur les berges, les activités portent essentiellement sur le maraichage et la fabrication de pirogues. Cette partie de la zone d'étude subit une pollution importante occasionnée par le rejet des eaux usées et pluviales. Cette situation ne limite pas les activités des populations à proximité de la zone de mélange avec les eaux du fleuve qui semblent ignorer ou ne pas tenir en compte les effets de l'utilisation de ces eaux souillées.

3.1.3 La sous-zone des berges entre le pont et la Centrale

La sous-zone comprise entre les berges et la centrale électrique d'EDM s'étend sur une longueur de 1776 m. Elle part de l'angle de l'ancien mur de protection situé à proximité du collecteur d'eaux usées et la centrale. Les berges présentent à ce niveau un tracé quasi rectiligne, avec une faible rupture de pente à mi-distance.

Cette sous-zone dispose d'un mur de protection construit dans les années 50 et fortement dégradé et parfois effondré par endroit. Ce mur a subi des réhabilitations partielles en surface. La réalisation du mur s'est faite en plusieurs parties avec une technique différente : mur vertical en blocs de pierres avec ou sans contrefort, murets en blocs de pierres, à section trapézoïdale.

Le mur est apparent par endroits sur une longueur de 431 m, soit 24% de la longueur totale des berges entre le pont et la station électrique. Le mur apparaît dégradé sur près de 230 m. Cette situation pose la problématique de la protection globale des berges, nécessitant une combinaison d'actions allant de la réhabilitation ou la destruction de l'ouvrage existant, à la réalisation d'un nouvel ouvrage sur plusieurs parties des berges, avec la nécessité de procéder à une harmonisation de la conception et un raccordement entre les différents éléments réalisés.

3.2 Le bassin versant du Papparah

Le bassin versant du Papparah s'étend au sud de la ville de Kayes. Son étude est prévue en dehors du volet protection des berges, dans le cadre de la lutte contre l'érosion des sols. Cependant, le cours d'eau principal se jette sur le fleuve Sénégal à hauteur de la sous-zone de la Centrale EDM. A ce niveau, la dynamique fluviale fait fortement évoluer le lit et une importante sédimentation affecte l'écoulement du fleuve. Ce qui explique l'intégration de la zone de confluence dans la sous-zone de la Centrale, favorisant ainsi une prise en compte des effets de l'écoulement du Papparah dans la recherche de solutions durables de protection des berges du fleuve Sénégal.

La confluence du Papparah se présente sous forme d'une boucle très marquée notamment dans la partie aval, située avant la centrale EDM. A ce niveau, le lit du Papparah est très large et s'étend sur une distance de 150 m environ.

La zone de confluence se caractérise par un écoulement temporaire en fonction du régime des deux cours d'eau. Les écoulements, combinés avec le rétrécissement de la section d'écoulement au droit de la Centrale dû aux bancs de sable (dépôts solides) et aux rochers (seuils fixes sur le fleuve) et la configuration en boucle des berges, provoquent une accélération et une très forte érosion.

IV. DEROULEMENT DE LA MISSION

4.1 Mission d'identification

La mission d'identification composée des experts du groupement (M.C. ROUVIERE, M. WADE et O. HANE) était accompagnée des experts de l'Assistance Technique basés à Kayes. L'identification s'est déroulée en 2 phases.

4.1.1 La première phase de la mission

La première phase s'est déroulée selon le programme suivant :

- Mardi 26 au mercredi 27 (15 heures) : Départ St-Louis et arrivée Kayes,
- Mercredi après-midi : installation et rencontre briefing au siège de la zone Mali,
- Jeudi 28 matin : rencontre autorités de la Commune de Kayes, visite de terrain sur les berges et sous les 2 ponts du Paparah, collecte de données à la Commune de Kayes,
- Jeudi après midi : visite Service Hydraulique Régional et collecte de données, visite des berges rive droite,
- Vendredi 29 : visite des 2 ponts sur le Paparah et complément des données, visite du bassin versant du Paparah.
- Samedi 1^{er} mars : note de synthèse des constats et orientation (voir fichier joint), synthèse de la première partie de la mission avec l'équipe locale de l'AT.
- Dimanche 2 mars : préparation de la restitution de la première phase de la mission.

4.1.2 La seconde phase de la mission

La seconde phase de la mission s'est déroulée en présence des représentants de la Cellule Nationale OMVS Mali, de la CRGP, des Services Techniques présents à Kayes et des autorités administratives. Les activités suivantes ont été menées :

- Lundi 3 mars matinée :
 - o briefing de début avec mission CRGP,
 - o rencontre des acteurs présents à Kayes et information sur le programme (Gouvernorat de Kayes),
- Lundi 3 mars après-midi:
 - o rencontre et séance de travail avec mission CRGP, Cellule OMVS Mali, Hydraulique.
- Mardi 4 mars matinée : Restitution du chronogramme des activités de mars et synthèse de la mission.

4.1.3 Activités et résultats

Sur la base des termes de référence de la mission, le bilan d'activités (prévision/réalisation) et les résultats obtenus ont été évalués. La mission a permis d'appréhender avec plus de précision les problèmes à résoudre notamment au niveau

des berges du fleuve (voir chapitre consacré à cet aspect) et à esquisser des pistes de solutions.

■ **Résultat n°1 : Les zones concernées par les travaux de réhabilitation des berges sont identifiées et sélectionnées.**

- **Activité 1.1 : Rencontre avec les acteurs nationaux et locaux.**

Cette activité a été menée dès le démarrage de la mission avec les contacts et rencontres avec les services techniques de la commune et de l'hydraulique régionale. L'information a été portée aux acteurs concernés et une réunion d'information a été organisée sous l'égide du Gouverneur de Région.

- **Activité 1.2 : Visite d'identification des sites et délimitation des zones prioritaires.**

Cette activité a été menée en compagnie du Chef des Services Techniques de la Commune, du représentant de l'Hydraulique et de celui de la Commune Rurale de Liberté Dembaya. La visite s'est déroulée le long des berges sur les rives droites et gauches du Sénégal entre le pont et la confluence avec le Papparah, sur l'emprise des 2 ponts sur le Papparah sur une bande de 450 m et sur certains sites du bassin versant du Papparah. Des relevés au GPS ont été faits et des couches cartographiques ont été obtenues (images et cartes thématiques).

- **Activité 1.3 : Concertation et choix des zones prioritaires à réhabiliter.**

La concertation a été amorcée avec des précisions apportées par les acteurs (la commune notamment) sur les sous-zones prioritaires. Par ailleurs, la mission (dans sa seconde phase en compagnie de l'OMVS, de la Cellule Mali et des Responsables des services techniques nationaux) a assuré l'information des parties prenantes et a différé la définition des longueurs des zones prioritaires à protéger.

- **Activités 1.4 : Evaluer avec les acteurs les travaux à réaliser.**

■ **Résultat n°2 : Les besoins en études et investigations complémentaires sont identifiés et les TDR sont ébauchés et proposés à la CRGP**

- **Activité 2.1 : Revue de la documentation existante sur la zone**

Une liste de documents requis a été élaborée et communiquée à l'expert institutionnel de l'AT en vue de la poursuite de recherche documentaire auprès des acteurs présents à Bamako. La documentation au niveau de Kayes est quasi inexistante et incomplète. La plupart des cartes thématiques ne sont pas disponibles à l'IGM.

Les données hydrologiques (courbes hauteur-débit depuis 1950, liste et emplacement des échelles, altitude du zéro de l'échelle de mesure du niveau du fleuve à Kayes) ont été collectées auprès des services de l'Hydraulique.

Des cartes au 1/200 000^{ème} et images de la zone d'intervention ont été acquises.

- **Activité 2.2 : Rencontre avec les acteurs locaux (partenaires au développement notamment).**

Les Ong et projets et programmes n'ont pas été visités, les délais de mission étant très courts et coïncidant en partie avec un week-end, la priorité a été accordée aux visites de terrain en compagnie de l'expert chargé de l'érosion (qui devait écourter son séjour le dimanche 2 mars).

- **Activité 2.3 : Définir les besoins en études et investigations complémentaires et préciser les résultats attendus.**

Ce travail a démarré avec l'élaboration des TDR de l'étude topographique. Il sera poursuivi dans le cadre de la recherche documentaire portant sur les sols, la topographie et le relief, la couverture végétale, la géologie, l'hydrologie... Cette activité concerne essentiellement le bassin versant du Paparrah.

- **Activité 2.4 Elaborer les TDR et DAO des études complémentaires en précisant les données disponibles et celles à acquérir.**

Les TDR des études topographiques sur les berges du fleuve ont été élaborés et transmis à un opérateur local (voir fichier joint). Une liste détaillée de la documentation complémentaire a été dressée.

- **Résultat n°3 : Les éléments du DAO sont élaborés et mis au format banque mondiale pour les sites non concernés par les études complémentaires.**

Les activités concernant ce résultat seront réalisées à l'issue de la mission de terrain. Un chronogramme de la période de mars à avril a été dressé et validé lors la réunion de synthèse du 4 mars.

4.2 Etudes complémentaires réalisées

La mission a donné lieu à une première évaluation des actions complémentaires à mener avant la conception finale des produits attendus (notamment le DAO des travaux de protection des berges).

Ces études ont consisté à réaliser des levés topographiques ont permis de dresser la présente note technique comportant une présentation, une analyse et une comparaison des options de protection des berges les plus couramment mises en œuvre dans la sous-région.

Cette étape importante d'investigations complémentaire est destinée à faciliter le choix définitif des zones d'interventions prioritaires et des options de protection combinant une efficacité et une harmonie avec le paysage et cadrant avec les prévisions budgétaires.

La restitution publique de la présente étude marquera le démarrage effectif de l'élaboration du Dossier d'Appel d'Offres sur la base des options et des sites retenus.

V. PROBLEMES A RESOUDRE

5.1 Centrale EDM

Le Poste de transformation électrique de Kayes est exposé à une très forte érosion en l'absence d'ouvrage de protection avec la dégradation et la chute de l'ancien mur.

L'érosion se manifeste aux abords immédiats de la station et au niveau des berges situées entre celle-ci et le lit principal du Paparrah. Cette partie des berges est la plus menacée et les effets de l'érosion pourraient à terme, s'étendre au-delà de la centrale, notamment vers la station de potabilisation des eaux de surface.

Cette zone de la centrale concentre donc des infrastructures stratégiques (eau et électricité) dont la pérennité est menacée par l'évolution géomorphologique du tracé du fleuve. Leur délocalisation pouvant occasionner des investissements et des délais exorbitants, les actions immédiates de protection envisagées par l'OMVS dans le cadre du projet GEF constituent une alternative crédible notamment lorsque les solutions adoptées sont efficaces et durables.

Par ailleurs, ces actions concourent à atténuer les impacts des aménagements réalisés en amont et à assurer une maîtrise du fonctionnement du fleuve et de ses affluents.

5.2 Culée gauche du pont

Le remblai de protection de la culée gauche du pont présente des affouillements et une érosion. Ces phénomènes ont pour conséquence un début d'affaissement perceptible du perré maçonné.

Par ailleurs, entre la culée du pont et le mur de soutènement construit en 1953, on note une très forte érosion des berges. Cette érosion est accentuée au niveau de la zone de rejet du collecteur, liée à l'écoulement des eaux usées et à celui des eaux de pluies, sur les berges du fleuve présentant une pente très marquée. Cette érosion régressive pourrait affecter à terme la stabilité du collecteur et au-delà, menacer l'aire de circulation et les zones d'habitation.

5.3 Berges rive gauche

■ Dégradation des berges rive gauche entre le pont et la centrale EDM

Elle est moins marquée sur cette partie de la zone d'intervention. L'écoulement dans cette partie du fleuve se fait sur une section plus importante. Les dépôts solides, pouvant favoriser des accélérations localisées liées à la restriction de la section d'écoulement sont moins marqués.

Les causes sont diverses : existence d'un mur de protection à différents endroits, pratiques d'activités agricoles utilisant des techniques de culture en terrasse participant à une stabilisation des berges, pentes très faibles.

On remarque cependant une érosion liée au ruissellement des eaux de pluies. L'imperméabilisation du sol au niveau des zones d'habitations et de la rue bordant les berges favorise un écoulement latéral important par endroit, accentué par les fortes pentes du terrain naturel. Des ravines sectionnent la rue et menacent de façon régressive les habitations.

■ Fréquentation des berges et exploitation diverses

Les berges constituent une zone de fréquentation privilégiée et les populations y exercent diverses activités : pratiques agricoles (maraîchage, arboriculture), pêche, transport fluvial entre les 2 rives du fleuve Sénégal, commerce de poisson importé, fabrication de pirogues, promenades et places publiques...

■ Rejet d'ordures

L'impact de ces activités sur les berges n'a pas été évalué, mais certaines pratiques favorisent une forte dégradation de l'environnement au niveau des berges.

La sous-zone est le siège d'une forte pollution liée aux rejets d'ordures et de déchets d'origines diverses : traitement du poisson importé, ordures ménagères, ruissellement des eaux de pluies, eaux usées domestiques....

Les berges sont utilisées comme dépotoir des ordures ménagères. Des décharges clandestines existent tout le long des berges, contribuant à une pollution de plus en plus importante de cette sous-zone. Parfois l'accumulation des ordures dans les ruelles étroites gêne la circulation.

Les berges sont utilisées pour le déversement des eaux usées et l'évacuation des excréta, en l'absence d'ouvrages d'assainissement.

Cette situation affecte la santé des populations. Et au-delà des problèmes de santé, d'hygiène et d'assainissement que vivent les populations riveraines, l'impact visuel très négatif pourrait aussi affecter le développement touristique de la ville.

5.4 Perspectives

L'aménagement des berges, au-delà des protections envisagées dans le cadre de ce programme, devra prendre en compte la dimension touristique et environnementale. Il pourrait être envisagé de mettre en place une protection en grille qui ne perturbe pas la vue du paysage fluvial, tout en limitant les accès nuisibles aux berges (dépôts d'ordures, rejets d'eaux usées...).

Des activités d'IEC pourraient également être envisagées dans une perspective de gestion durable de l'environnement au voisinage des berges. Des séances de sensibilisation et d'information auprès des populations proches des berges complèteraient avantageusement les actions prévues.

■ Aménagements des berges

Les travaux de protection et de stabilisation des berges devront s'intégrer dans un cadre global d'aménagement urbain et de sauvegarde des infrastructures.

Les actions suivantes devront être menées en étroite collaboration avec la commune et les services techniques impliqués en vue de pérenniser les aménagements réalisés ou prévus :

- une sensibilisation des populations qui leur permettra de mieux appréhender le bien fondé des actions de protection des berges et des aménagements prévus ultérieurement ;
- organiser un monitoring strict des berges afin de suivre et de mesurer leur évolution et leur transformation notamment suite aux actions anthropiques et de contrôler les vellétés de leur occupation par les populations.
- identifier les technologies maîtrisées et des opérateurs locaux potentiels permettant leur implication dans les choix techniques et une intégration des activités actuelles pour minimiser les impacts économiques négatifs. A titre d'exemple, la réalisation d'ouvrages sur 2 niveaux dégagerait des espaces pouvant être affectés aux populations dans le cadre d'une exploitation maîtrisée (poursuite des activités agricoles...).

■ Lutte contre la pollution et protection de l'environnement des berges

La réalisation des ouvrages devrait contribuer à lutter contre la pollution des berges. Il est envisagé, en prélude aux travaux, de procéder à une collecte et à une mise en décharge des déchets existant.

Une protection et une conservation efficaces de l'environnement des berges passent par l'amélioration de l'assainissement de la zone d'intervention, en intégrant la demande des population. L'évaluation de la demande peut se faire à travers un diagnostic poussé des pratiques en matière d'assainissement intégrant un inventaire des ouvrages existant et une discussion participative sur les meilleures solutions.

Les actions à entreprendre devront porter sur :

- la gestion des eaux usées et des excréments : une analyse de la situation actuelle, la définition et l'adoption de solutions adaptées, l'assistance aux populations pour le financement et la réalisation des ouvrages...
- la gestion des ordures ménagères : identification de sites de décharge, de zones de transit, de tri et de traitement, contrôle et surveillance continue au niveau des berges impliquant les populations...
- une sensibilisation sur les activités économiques pratiquées au niveau des berges mais nuisibles à la santé des populations (activités menées à proximité des décharges d'ordures et au droit du collecteur d'eaux usées).

VI. PRINCIPALES TECHNIQUES DE PROTECTION

6.1 Techniques lourdes

Les techniques lourdes les plus utilisées sont l'enrochement et le mur en béton armé. La description suivante porte sur l'enrochement.

6.1.1 Principe

Cette technique consiste à ériger le long de la berge endommagée par l'érosion un "mur" en rochers d'épaisseur fixe ou variable. L'espace laissé entre l'ouvrage et les berges est comblée par un remblai en terre, sable ou graviers.

Entre les rochers et ce matériau on place généralement un matériau géotextile ou un film plastique pour éviter les pertes de terre par ruissellement (affouillement, renard...) de la berge vers la rivière. Ce "filtre" doit laisser passer l'eau et doit retenir les fines et les cailloux. Pour que la ligne d'enrochement tienne, la première rangée de roches, sur laquelle repose tout l'ouvrage, est quasiment complètement enfouie dans au moins 60 cm de sol et constitue l'ancrage. On construit généralement l'ouvrage de sorte à ce qu'il tienne seul sans le remblais de terre; on s'assure ainsi de sa solidité.

6.1.2 Matériaux utilisés

Pour un même ouvrage les matériaux utilisés doivent être de qualité homogène. Les blocs de roche doivent posséder une dureté suffisante pour pouvoir être déversés en vrac et manipulés avec des engins mécaniques. Ils doivent être homogènes et propres autant que possible, ne s'altérer ni à l'air ni à l'eau et être exempts de fissures.

Les caractéristiques géométriques des blocs seront définies en fonction de la puissance érosive du cours d'eau, de la vitesse maximale, de la hauteur d'eau et de la pente du talus. De manière générale la masse moyenne des blocs est de l'ordre de la tonne. On cherche le plus souvent à avoir le plus de blocs possible de la même taille, mais on peut avoir des blocs pesant largement jusqu'à plusieurs fois la masse moyenne choisie par le maître d'œuvre.

Les roches doivent être de préférence à angles marqués et de forme tétraédrique en respectant un ratio compris entre 1 et 2 entre la longueur et l'épaisseur. Les caractéristiques physiques des matériaux permettent de valider la solidité de l'ouvrage. On recherche des matériaux non calcaires ayant un poids spécifique apparent sec de l'ordre de 2500kg/m^3 . La sensibilité au gel doit être très faible et sa résistance à la compression élevée.

6.1.3 Autres types de confortement de berges

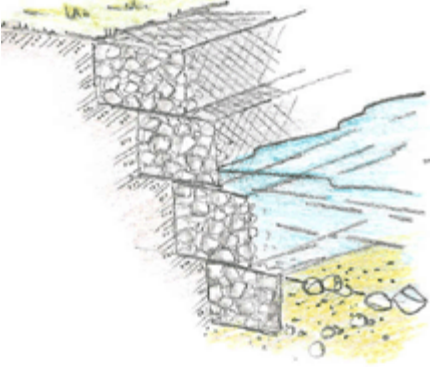
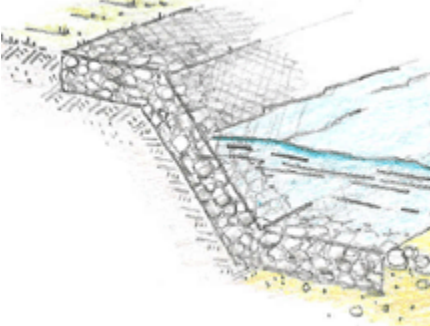
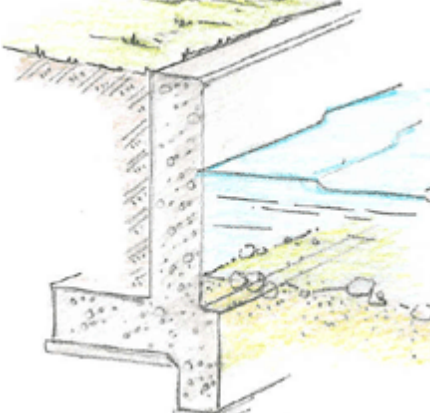
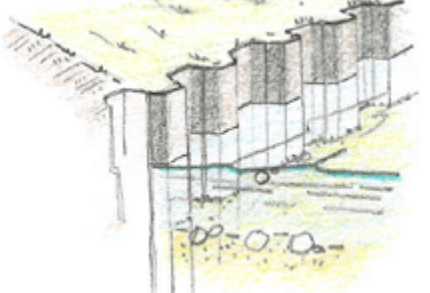
<p>Gabions</p>	<p>Enveloppes de grillage remplies de pierres, confectionnées sur leur lieu d'implantation. Leur souplesse leur permet de s'adapter à l'évolution du lit de la rivière. Leur valeur esthétique est faible mais peut être améliorée par végétalisation.</p>	
<p>Matelas-gabions</p>	<p>Matelas construits sur le principe des gabions d'environ 20cm d'épaisseur. Ils sont plus discrets que les gabions et se végétalisent plus facilement. Ils s'adaptent bien en cas d'évolution du lit et des berges</p>	
<p>Murs</p>	<p>Constitués de pierre, moellons ou béton ils remplacent la berge et font du cours d'eau un canal. A réserver pour les agglomérations, leur intégration au site est difficile et relève de l'urbanisme.</p>	
<p>Palplanches</p>	<p>Feuilles de métal épais préformées et emboîtables les unes dans les autres. Protection rigide à réserver à des usages précis: restauration de chaussées, consolidation d'anciennes protections, de ponts.</p>	

Tableau 2 : Techniques lourdes de protection des berges

6.1.4 Avantages et inconvénients

■ Inconvénients

- **Modification du régime hydraulique du cours d'eau le long du linéaire mis en place.** L'écoulement est en effet accéléré par la réduction de la rugosité de la berge. Ainsi il existe des risques de déstabilisation de la berge en amont, en aval ou en rive opposée de l'ouvrage, par épanchement de l'énergie hydraulique supplémentaire créée par la sur vitesse. Le schéma suivant montre les zones qui seront plus sensibles à l'érosion autour de l'ouvrage:

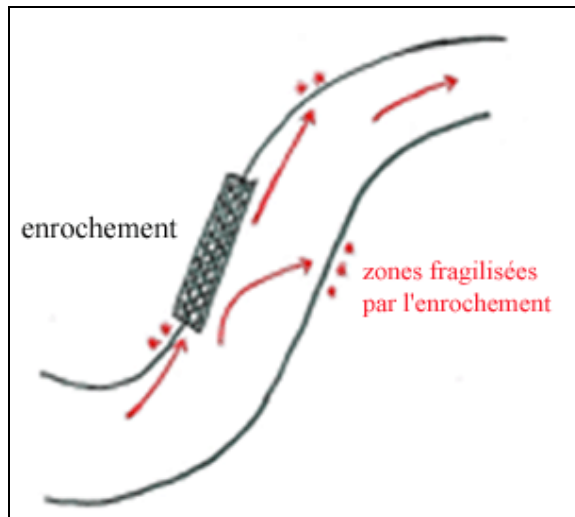


Figure 2 : Illustration des zones fragilisées

- **Mauvaise résistance au marnage rapide et aux variations saisonnières du régime :** elle constitue une des faiblesses de l'enrochement. Les ouvrages réalisés avec peu de soins peuvent présenter des affaissement ou des déboitements en amont et en aval, menaçant la stabilité de l'ouvrage, notamment lorsque l'eau passe au dessus ou à travers l'ouvrage. Cette faiblesse doit être corrigée par un ancrage suffisant et une protection à la base de l'ouvrage par des blocs de taille plus importante. Cette protection justifie parfois le prolongement des ouvrages jusqu'à l'entrée des cours d'eau en amont ou en aval de la zone protégée (cas de la jonction avec le Papparah), ce qui engendre des coûts supplémentaires.
- **Le manque d'entretien de ces ouvrages peut avoir des conséquences coûteuses.** Les contrôles à la base de l'ouvrage doivent permettre d'anticiper sur les affouillement pouvant engendrer des dépenses d'entretien et de réfection importantes et coûteuses, pouvant entraîner une reconstruction partielle ou complète. La surveillance doit être étendue à la végétation environnante dont la configuration combinée avec l'action du vent et les fortes crues peut entraîner un affaissement des ouvrages.

■ Avantages

Parmi les avantages des techniques lourdes, on peut citer :

- En cas de réalisation conforme aux règles de l'Art, une grande résistance aux crues importantes et aux fortes agressions hydrauliques.
- Durant la première année après l'installation, une adaptation à la forme de la berge par tassement des blocs et un gain de résistance.

- Solutions préférables lorsque des habitations sont très rapprochées de la zone à conforter. Elles peuvent être placées à la verticale et nécessitent une faible emprise (environ 1m).
- En cas de disponibilité du matériaux, la réponse à une demande de confortement en cas de besoin est rapide. En effet, quelle que soit la saison le matériau peut être disponible et l'efficacité de l'ouvrage est immédiate.

6.2 Techniques douces

Ces techniques dites douces concernent les solutions apportées par le génie végétal en majorité. Elles sont basées sur l'utilisation de matériaux végétaux inertes ou vivants.

6.2.1 Principes

Le génie végétal favorise une protection naturelle des berges en conservant la végétation existante. Les buts principaux sont comme les techniques de génie civil d'offrir une solution efficace à un problème de protection des sols (érosion, glissement,...) tout en engendrant un coût de réalisation raisonnable.

Cependant l'essentiel de leur intérêt repose sur les objectifs suivants:

- considérer le cours d'eau comme un complexe formé d'un lit, de berges et de rives en relation avec le bassin versant et les nappes phréatiques;
- maintenir une diversité maximale d'habitats aussi bien au niveau du lit que des berges et des rives ;
- garder une morphologie correcte et typique au cours d'eau ;
- éviter une structure rocheuse des berges là où elle n'existe pas naturellement ;
- respecter une distribution étagée de la végétation, du pied au sommet de la berge, régie par des conditions hydriques et hydrauliques ;
- intégrer l'ouvrage dans son site ;
- minimiser l'impact occasionné par l'implantation d'un ouvrage de stabilisation.

6.2.2 Différents types de protection

■ Protection avec matériaux inertes

Les protections en matériaux végétaux inertes sont faciles à réaliser sur de petits cours d'eau lorsqu'elles sont faites avec du bois pris à proximité. Elles sont plutôt destinées à la stabilisation des pieds de berges et s'accompagnent de plantations.

Différents types de techniques végétales sont recensés, parmi lesquelles :

- Clayonnage : Pieux et branches vivantes fraîchement coupées entrelacés ;
- Tunage : pieux derrière lesquels sont solidement fixés des planches ou des rondins à l'horizontale + filtre derrière la protection (matériaux d'assez forte granulométrie ou géotextile).
- Fascine : Fagots de branches fraîchement coupées disposés horizontalement derrière des pieux.

■ Protection avec des matériaux vivants

On distingue aussi les caissons végétalisés et les peignes. D'autres techniques utilisent les matériaux vivants (enherbement, végétation buissonnante ou arbustive, arbres) qui consistent à mettre en terre des espèces vivantes qui vont coloniser le secteur aménagé.

Les espèces doivent être variées, adaptées au type de sol, au degré d'humidité et de préférence existant naturellement dans le secteur. Il est préférable d'éviter les alignements monotones. L'entretien (moyens techniques et humains, accès..) doit être prévu avant même la plantation.

La protection que les plantations apportent doit s'exercer sur l'ensemble du talus et le sommet de la berge (essences ligneuses de haut port). Généralement les plantations ne s'effectuent qu'en complément à d'autres techniques.

Cette technique regroupe les méthodes suivantes :

- Enherbement ;
- Arbres ou arbustes en berge ;
- Tapis végétal.

■ Utilisation du géotextile

Les géotextiles ne sont que partiellement utilisés en génie végétal. En effet, leurs propriétés mécaniques et hydrauliques ne sont pas les seuls critères de choix mais aussi leur capacité à la végétalisation à savoir que des tiges et des racines doivent pouvoir les traverser.

La durée d'efficacité d'un géotextile en génie végétal est limitée: il doit en fait assurer ses fonctions pour la durée nécessaire au développement d'un enracinement suffisant. Il est donc courant d'utiliser des géotextiles putrescibles qui formeront de plus de l'humus. Les matériaux souvent utilisés sont: le jute, la fibre de coco, le lin, les roseaux.

Les fonctions des géotextiles sont les suivantes:

- effet protection: contre le ruissellement et l'érosion éolienne avant que la végétation ne prenne le relai, contre le glissement et l'érosion de la couche superficielle
- effet renforcement: améliorent la stabilité du talus, affermissent les couches de sol peu cohérentes jusqu'à la pénétration complète des racines; support rugueux offert aux premières plantations
- effet filtre: limite la migration des particules fines
- effet stimulation: protection des graines, maintien de l'humidité et accumulation de chaleur propices à la germination et à la croissance végétale

6.2.3 Avantages et inconvénients du génie végétal

■ Avantages

L'utilisation de plantes vivantes à la place de matériaux de construction inertes, type enrochement, apporte certains avantages:

- Les techniques végétales acquièrent une efficacité de stabilisation croissante au fur et à mesure du développement des plantes car elles sont vivantes. Leur résistance aux forces d'arrachement est comparable (voire supérieure) aux techniques minérales actuelles.
- Elles opposent une résistance souple aux forces du courant et permettent de mieux dissiper l'énergie.

- Elles sont souples dans leur application, car leur grande diversité, les possibilités de les combiner ou de les joindre à des matériaux auxiliaires leur confèrent une grande capacité d'adaptation, répondant aux besoins de chaque cas particulier.
- Elles favorisent l'autoépuration du cours d'eau au niveau des racines.
- Elles ne perturbent pas les relations entre le cours d'eau et les nappes phréatiques.
- Elles contribuent à maintenir et restaurer une grande diversité botanique.
- Elles sont peu coûteuses en fourniture car les matériaux peuvent souvent être prélevés sur place.
- Les ouvrages eux-mêmes sont susceptibles de fournir le matériel végétal pour d'autres ouvrages après quelques années.

■ Inconvénients

Malgré ces avantages il existe des facteurs limitant à l'application des techniques végétales directement liés aux conditions de croissance des végétaux: altitude, lumière, type de substrat, régime des eaux ...

La limite d'utilisation de ces techniques se situerait à partir d'une pente de 3% sous 1m de hauteur d'eau (valeurs déterminées à partir du calcul de la force tractrice en relation avec des événements hydrauliques réguliers ou exceptionnels).

D'autre part on peut signaler les points suivants:

- L'efficacité n'est souvent pas maximale dès la finition de l'ouvrage. En effet la première année suivant l'installation est capitale, car tous les végétaux plantés doivent prendre racine et pendant cette période l'ouvrage est très fragile et peu résistant aux montées des eaux. Cependant les limites inférieures peuvent être améliorées par l'utilisation de géotextiles ou autres techniques de fixation.
- Certains types de réalisations sont exigeants en main d'œuvre et en matière première (couches de branches, lit de plants, fascine)
- Il se pose aussi le problème de mise en place de l'ouvrage qui ne peut se faire qu'en saison favorable (avant la montée des eaux), parfois incompatible avec les conditions de survie des plantes. Cette technique n'est donc pas adaptée à la réponse des urgences en toutes saisons.
- L'entretien de ces ouvrages combinée avec la protection phytosanitaire est aussi capital. Si dans les premières années il est négligé, l'ouvrage a peu de chance de résister. Il faut aussi veiller à maîtriser l'envahissement de certaines espèces animales nuisibles qui peuvent proliférer lors de la réalisation de l'ouvrage et le détruire entièrement.

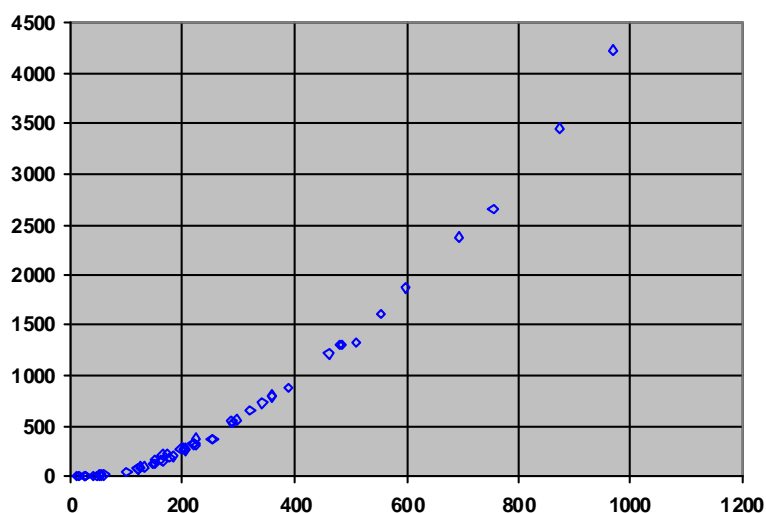
VII. ANALYSE SOMMAIRE DES OPTIONS

7.1 Hypothèses de travail et données de base

7.1.1 Données hydrologiques

La courbe de tarage ci-dessus donne l'évolution du niveau du fleuve Sénégal en fonction du débit jaugé. Ces informations émanent des services de l'hydraulique de Kayes, et les données fournies portent sur la période d'avril 1963 à janvier 2007 et ont été collectées à partir de l'échelle située sur l'ancien débarcadère en aval du pont sur la rive gauche (longitude 11° 27', latitude 14°27'). L'échelle existe depuis 1892 et les enregistrements ininterrompus, ont démarré en 1903.

Courbe débit (en ordonnées m³/s) –hauteur (en abscisses en cm) à Kayes



Graphique 1 : Courbe de tarage du fleuve Sénégal à hauteur de Kayes

L'altitude du zéro de l'échelle se situe à 20,16 m IGN. En considérant les crues maximales notées avant la construction du barrage de Manantali, on constate une hauteur d'eau maximum de 10 m, soit une cote de 30,16 m.

La cote d'étiage et la pente de la ligne d'eau n'ont pas été déterminées. Ces données seront essentielles pour le calage définitif des fondations et la définition des mesures de protection à la base des ouvrages.

De plus, la détermination des vitesses d'écoulement, essentielle pour l'évaluation des profondeurs des affouillements et le dimensionnement des enrochements de protection éventuels, n'a pu se faire au cours de la présente étude.

Toutefois, les données hydrologiques existent au niveau du Service Régional de l'Hydraulique sur une période suffisamment longue. Ces données pourront permettre de faire une étude hydrologique.

7.1.2 Données topographiques

Une synthèse des données topographiques tirée des profils en long et des profils en travers est donnée en annexe. Les données moyennes et caractéristiques suivantes ont été relevées, notamment pour la zone située entre le pont et l'entrée du Paparrah :

- Longueur totale : 1776 m
- Nombre de profils en travers : 78

▪ Ecartement moyen entre profils en travers :	23 m
▪ Nombre de points du profil de long :	68
▪ Cote maxi :	33,90 m
▪ Cote mini :	31,84 m
▪ Hauteur moyenne :	10,09 m
▪ Largeur berge maxi :	44,27 m
▪ Largeur berge mini :	13,53 m
▪ Largeur moyenne berges :	26,50 m
▪ Pente moyenne des berges :	41%

7.1.3 Calage des cotes et hauteurs des ouvrages

Selon le Service de l'Hydraulique de Kayes, le dimensionnement du pont sur le fleuve est basé sur la crue de 1958, avec une hauteur d'eau de 13,28 m soit une cote de 33,44m pour le tablier du pont.

En considérant la crue de type A de 2500 m³/s à Bakel, recommandée par l'OMVS pour le calage des aménagements sur le fleuve Sénégal, la cote de calage du sommet des ouvrages devrait s'établir à 28,16 m au moins pour une hauteur d'eau de 8 m correspondant au débit de la crue de type A.

La cote du terrain naturel longeant les berges à partir de la route menant au transformateur électrique varie de 31,84 à 33,90 m, soit une dénivelée de 3,68 à 5,74 m entre la plan d'eau maximum et le terrain naturel.

La base de l'ouvrage de protection sera calée à 22 m pour une première estimation de la hauteur de l'ouvrage dans l'attente des données hydrologiques plus précises. Cette valeur permet de se placer dans des conditions plus favorables, en évitant de noyer la base des ouvrages en périodes de basses eaux plus fréquentes (entre 5 cm la cote mini observé depuis 1963 et 2,05 m). Les valeurs de cette classe de hauteur d'eau représentant près de 60 % des enregistrements entre le 19/7/63 et le 31/8/2007.

7.1.4 Etudes des sols de fondation

La description des sols de fondation n'a pas été faite en l'absence d'une étude détaillée. A cet effet, le calcul des fondations ne sera basé que sur les approches de pré-dimensionnement des différents éléments des ouvrages proposés. La réalisation des études de sols sera envisagée dans le cadre de l'élaboration des dossiers d'exécution. Pour les besoins de la présente étude, une évaluation sommaire de la portance des sols, sur la revue documentaire servira de base de travail.

7.2 Solutions techniques

7.2.1 Typologie des ouvrages

Il existe une diversité de techniques de protection des berges, comportant parfois une protection végétale.

L'acuité des problèmes à résoudre et l'urgence à réaliser ces travaux de protection amènent à considérer quelques solutions plus accessibles (en termes de conception et de mise en œuvre) et réalisables dans des délais relativement courts. Ces solutions ne sont pas dépourvues de contraintes de mise en œuvre (notamment en matière de disponibilité de matériaux et de main d'œuvre) et comportent aussi quelques inconvénients dont l'analyse permettra de décider des options finales.

Les solutions présentées peuvent répondre aux perspectives d'aménagement ultérieur des berges, en veillant à leur harmonie avec le paysage (notamment en tenant compte des ouvrages existants) et l'environnement de la zone d'intervention. Leur conception pourrait également faciliter ou au contraire exacerber la pollution notée sur les berges.

La conception tient compte aussi du fait que les travaux doivent s'inscrire dans une logique de continuation des actions de protection des berges.

Les fiches jointes en annexe décrivent et précisent les données de prédimensionnement des ouvrages par option et par variante. Des extraits de plans indiquent la localisation des ouvrages projetés.

7.2.1.1 Protection de la centrale EDM

Une protection durable de la Centrale passe par la réalisation d'ouvrages de soutènement au niveau des berges. Cette solution comporte aussi la protection des berges entre l'entrée du Paparrah et la Centrale.

L'espace situé entre le mur et les berges actuelles sera comblé par un remblai de terre compacté.

Au niveau des berges entre la centrale et le Paparrah, les solutions optionnelles porteront sur :

- (i) la réalisation d'un mur en gabions ou en béton armé au niveau (du pied des talus) des berges,
- (ii) la réalisation d'une digue prolongeant l'entrée du Paparrah et la mise en place d'un remblai dans l'espace situé entre la digue et les berges.

7.2.1.2 Protection de la culée du pont sur le fleuve Sénégal

Les mesures de protection envisagées au niveau du pont et dans l'espace situé entre le pont et l'ancien mur sont les suivantes :

- réalisation d'un mur de protection en gabions ou en béton armé selon 2 tracés,
- prolongement et renforcement du collecteur des eaux usées depuis son emplacement actuel jusqu'à la base du nouveau mur,
- mise en place d'un remblai compacté entre l'espace situé entre le nouveau mur et la rue jouxtant la sous-zone.

7.2.1.3 Protection des berges de la centrale au pont

La protection des berges entre le pont et la centrale combinera plusieurs actions, parmi lesquelles :

- la réalisation d'un mur de soutènement en béton armé ou en gabions,
- la réhabilitation du mur existant et l'aménagement de points de passage et d'accès aux berges,
- la réalisation d'un remblai compacté entre le mur et les berges,
- la collecte et la mise en dépôt des ordures et déblais non réutilisés.

7.3 Spécifications techniques

Le présent chapitre a pour objet de définir les spécifications techniques minimales des ouvrages retenus dans l'analyse des options : mur en béton armé, mur en gabions, digue et remblai.

L'Assistance Technique fournira pour le type d'ouvrage retenu, des prescriptions techniques plus complètes et plus détaillées lors de l'élaboration du Dossier d'Appel d'Offres.

Au besoin, les prestataires des études complémentaires et les entreprises fourniront davantage de précisions sur les documents de référence.

7.3.1 Ouvrages en béton armé

7.3.1.1 Principes de conception

Ce chapitre aborde brièvement les principes et base de conception et de calcul des murs de soutènement en béton armé. Le calcul détaillé du béton armé ne pouvant se faire en l'absence de données plus détaillées sur la configuration des sites à aménager, seule la démarche globale de conception sera annoncée.

■ Données de base

Les données de base à collecter avant la conception des ouvrages portent sur :

- *les caractéristiques géométriques du mur et du terrain* : hauteur depuis la fondation, hauteur du remblai après l'ouvrage, longueur et angle du talus du remblai au dessus du mur, la hauteur d'eau en avant de l'ouvrage (en cas de présence d'une nappe) ;
- *les caractéristiques mécaniques et physiques du remblai* : poids volumique, angle de frottement interne ;
- *les caractéristiques mécaniques et physiques du sol de fondation* : pression limite admissible, cohésion, angle de frottement interne ;
- *les charges d'exploitation* ;
- *la résistance caractéristique du béton* ;
- *le degré de gravité de la fissuration*.

La connaissance de ces données devra être complétée par celles concernant les caractéristiques géométriques du voile et de la semelle. A la suite des calculs préliminaires, les sections des armatures seront déterminées.

■ Formes de l'ouvrage

Il existe plusieurs formes de murs en béton armé. La forme la plus classique sera adoptée : le mur en « T renversé ». Cette forme, classée économique pour les hauteurs inférieures à 6 m, sera privilégiée par rapport au mur poids.

Pour assurer une meilleure stabilité de l'ouvrage au glissement, il est recommandé de disposer d'une bêche à l'avant ou à l'arrière de la semelle ou parfois en prolongement du voile. La disposition la plus conseillée consiste à placer la bêche à l'arrière de la semelle (en dessous du remblai).

Lorsque la hauteur du mur devient importante, il est conseillé de disposer des contreforts en avant ou à l'arrière du voile. Cette disposition a été adoptée le long des berges du fleuve au niveau de Kayes, un mur déjà réalisé dispose d'un contrefort à l'avant (entre le mur et le plan d'eau).

■ Démarche de conception

La démarche de conception se fera selon les étapes suivantes :

- Pré-dimensionnement de l'ouvrage avec la détermination des caractéristiques géométriques ;
- Le calcul des poussées sur l'écran fictif (à déterminer) ;
- La justification de la stabilité externe par une série de vérification portant sur le non-poinçonnement du terrain d'assise, le non-glissement sur la base, le non-basculement de l'ouvrage (notamment en présence de terrain rocheux), la vérification des tassements ;
- La justification de la résistance intrinsèque de l'ouvrage par le calcul des poussées et la détermination des armatures sur la base de vérification de la contrainte du béton.

■ Les principes de prédimensionnement

- **Caractéristiques de forme**

Le schéma suivant indique les règles simplifiées de détermination des caractéristiques de forme des murs-cantilever courants réalisés en béton armé. La section de l'ouvrage ainsi que les volumes unitaires de béton utilisés dans la détermination des coûts des ouvrages ont été déterminés sur cette base, dans l'attente des résultats des calculs détaillés.

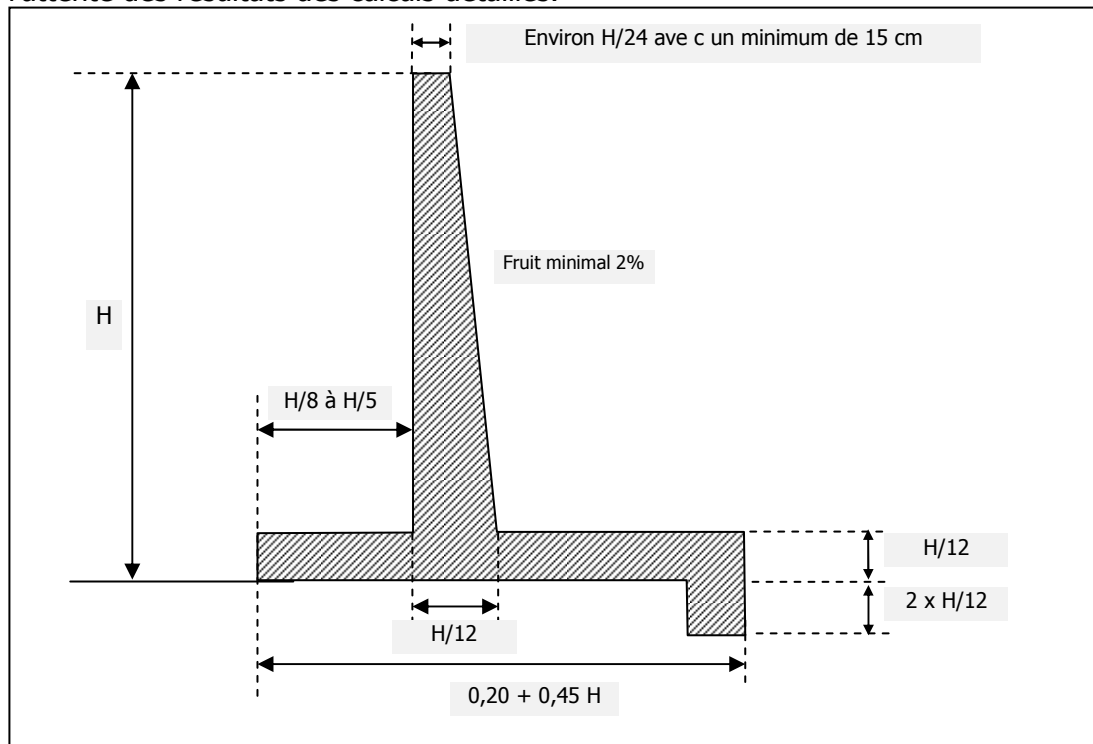


Figure 3 : Schéma de base de prédimensionnement d'un mur de soutènement en béton

- **Épaisseurs**

Pour l'épaisseur du bord supérieur du mur, il est conseillé d'adopter 20 cm pour les murs de hauteur inférieure à 6 m et de 30 cm pour les murs de plus de 6 m.

Par ailleurs, les épaisseurs de la base du mur et de la semelle sont prises égales. Ces valeurs sont considérées comme minimales, une majoration est souvent adoptée lors de la détermination des armatures.

- **Semelle**

Les dimensions de la semelle sont indiquées approximativement dans le schéma ci-dessus. Leur détermination précise est possible après la définition des paramètres suivants :

- la pression limite admissible du sol de fondation correspondant à l'état limite arrêté ;
- la hauteur du mur ;
- l'angle de frottement interne du remblai ;
- le coefficient de frottement admissible sol-béton.

Des abaques permettant de déterminer les 2 éléments de la fondation (le patin et la semelle) existent et pourront être utilisées pour vérifier les résultats du dimensionnement basé sur la connaissance des données de base mentionnées ci-dessus.

■ **Les mesures de protection**

La réalisation d'un enrochement de protection peut être envisagée au pied du mur. La détermination de la taille des blocs devant servir à cet effet sera faite avant la phase de mise en œuvre des travaux et précisée dans le DAO. De plus, la réalisation d'un dispositif de drainage peut être intégrée au remblai situé avant l'ouvrage en vue d'évacuer les eaux infiltrées et ruisselées.

7.3.1.2 Exécution des ouvrages en béton armé

L'exécution des ouvrages en béton armé se fera en respect des normes en vigueur notamment celle concernant les matériaux (agrégats pour béton armé), le ciment, l'eau de gâchage, l'acier pour béton armé et le coffrage.

Les spécifications techniques seront détaillées dans le dossier d'appel d'offres.

7.3.2 Ouvrages en gabions

7.3.2.1 Principes de conception

Ce chapitre aborde brièvement les principes et base de conception et de calcul des murs de soutènement en gabions.

■ **Données de base**

En plus des données de base indispensables à la conception des ouvrages de soutènement, il conviendra de préciser les caractéristiques du matériau à utiliser pour le remplissage des cages.

Par ailleurs, plusieurs études préalables sont indispensables au dimensionnement correcte de l'ouvrage :

- une étude hydraulique et hydrologique du cours d'eau ;
- une étude géotechnique de la berge en vue de déterminer les caractéristiques du sol de fondation.

La pertinence de ces études complémentaires est aussi fonction de la fréquentation des berges (avec la possibilité de réaliser des aménagements paysagers en surface) et de l'existence d'infrastructures. Dans ce cas, les données concernant la stabilité de l'ouvrage seront précisément déterminées.

■ **Formes de l'ouvrage**

A l'image des murs en béton armé, il existe une diversité de formes d'ouvrages en gabions destinés à la protection des berges.

La forme de base adoptée dans la présente analyse concerne le mur vertical, qui pour des raisons économiques et financières, offre une meilleure faisabilité.

Cependant, cette option a l'inconvénient de présenter une moins bonne stabilité, nécessitant un dispositif d'ancrage spécifique dont la description est donnée ci-après.

La méthodologie de réalisation de cet ouvrage est succinctement décrite dans les chapitres suivants.

La forme de base sera le mur vertical dont le profil est illustré par le schéma suivant. Une faible inclinaison peut être adoptée pour renforcer la stabilité de l'ouvrage. Aussi, l'option de base peut être déclinée en escalier de largeur égale à celle de la cage (1 m).

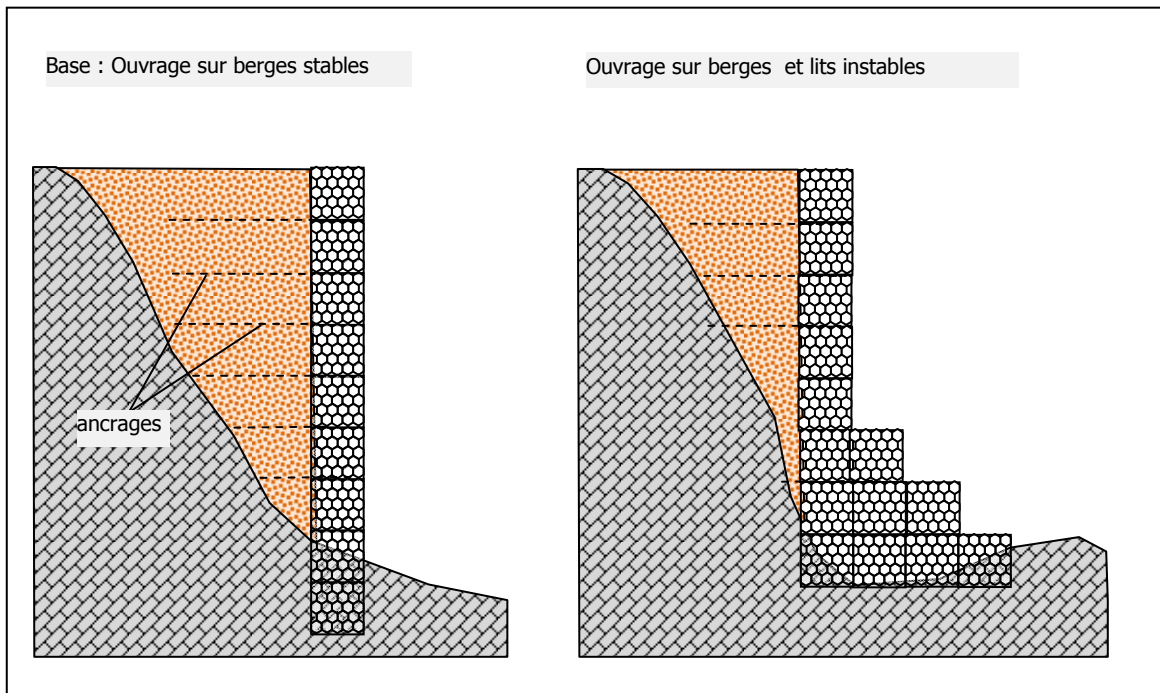


Figure 4 : Profil type des ouvrages en gabion

Le traitement de la base de l'ouvrage se fera en fonction des configurations rencontrées. La forme et la disposition géométrique finale résulteront des études complémentaires à réaliser.

Il est envisageable d'élargir la base et d'adopter un profil triangulaire en vue de renforcer la stabilité de l'ouvrage. La mise en œuvre de cette option restera marginale et devra être pleinement justifiée. La réalisation d'ouvrages verticaux sur d'importantes hauteurs (supérieures à 10 m) subissant d'importantes contraintes reste maîtrisée dans la sous-région (voir photos des ouvrages réalisés sur la Corniche Ouest de Dakar).



Figure 5 : Photos 1 et 2 : Mur en gabion de la Mosquée de la Divinité à Dakar.

Mur de gabion de profil vertical longeant la corniche ouest de Dakar à hauteur de la Mosquée de la Divinité. L'ouvrage comporte des aménagements pour l'accès à la mosquée et à la côte. Travaux réalisés par l'ANOCL.

Figure 6 : Photos 3 : Mur de soutènement de la Porte du Millénaire à Dakar.

Ouvrages de protection des côtes de Dakar à hauteur de la Porte du Millénaire sur la corniche ouest, combinant un mur béton en gradin protégé à la base par un enrochement, surmonté d'un perré maçonné sur les talus supérieurs selon 2 techniques (travaux en cours).

■ Les principes de prédimensionnement

Les dimensions de l'ouvrage sont tributaires des dimensions de base des cages. Pour le cas de la zone d'intervention, les gabions seront des éléments parallélépipédiques de 1 m de large.

Dans le cas d'une utilisation comme fondation les dimensions des cages peuvent atteindre 2 x 1 x 1 m et la forme cylindrique est possible pour les éléments immergés.

Pour les berges à fonds mobiles, l'utilisation de matelas RENO d'épaisseur 20 cm comme base de la fondation est envisageable. La largeur et la longueur seront variables et dépendront des caractéristiques géométriques des lits.

7.3.2.2 Exécution des ouvrages en gabions

■ Matériaux

- Structure

Les gabions en cage d'une largeur de 0.50 ou 1.00 m et d'une longueur de 1, 1.50, 2.00 ou 3.00 m (voire exceptionnellement 4.00 m) doivent être entièrement repliables et pré-assemblés en usine, composés de parois en treillis métallique en fil de fer tressé en triple torsion de haute résistance.

La maille sera de forme carrée ou hexagonale de section de type 60, 80 ou 100 mm. Le treillis est réalisé avec du fil en acier galvanisé, d'épaisseur comprise entre 2,8 et 4,5 mm. Le fil est traité anti-corrosion par revêtement efficace garantissant parfois une longévité de 60 ans. Compte tenu de la nature agressive du milieu, le fil est renforcé par revêtement PVC pouvant porter la longévité de la structure à près de 120 ans.

L'assemblage des différents éléments se fait par spirale multi vrilles en acier inoxydable (3 vrilles par maille de 76,2 mm, soit 39 points d'attache par mètre linéaire).

Ce système d'assemblage permet d'avoir un mur monolithe sur toute sa longueur car tous les gabions sont fixés entre eux. Ce système d'assemblage évite des joints entre les gabions. Ces spirales protègent également les parties saillantes du treillis, et apportent une sécurité contre d'éventuelles blessures ce qui s'avère très important dans les lieux publics.

De par sa rigidité, la structure une fois dépliée est prête au remplissage et ne nécessite aucun arrimage.

La jonction des gabions est faite à l'avant et à l'arrière en croisant les 2 spirales verticales l'une dans l'autre pour les maintenir à l'aide d'une tige métallique rigide.

Les gabions ont une résistance et une souplesse suffisantes pour s'adapter à de légers mouvements et aux variations du sol en cas de tassement ou d'affaissement.

- **Moellons de remplissage**

Le remplissage des cages sera réalisé soit avec des blocs ou moellons de latérite, soit avec des blocs ou moellons de basalte de caractéristiques équivalentes. Il est recommandé d'éviter les matériaux roulés car ceux-ci ne se calent pas entre eux.

La plus petite dimension ne sera pas inférieure à 0,20 m, et la plus grande dimension ne sera pas supérieure à 0,40 m. Les cages métalliques seront réalisées en grillage de type Terramesh.

- **Géotextiles**

Les ouvrages en gabions ne nécessitent pas de fondations particulières. L'interposition d'un géotextile sous les gabions ou à l'arrière de l'ouvrage permet d'éviter la migration des fines au travers de celui-ci.

Une membrane géotextile sera disposée entre le gabion et le remblai. Cette disposition est exigée en vue d'éviter les pertes de matériaux, tout en assurant une perméabilité de l'ouvrage, évitant ainsi une pression supplémentaire en cas de présence d'une nappe d'eau.

Les géotextiles utilisés sur le chantier seront des géotextiles non tissés aiguilletés de filaments continus en polypropylène et répondront aux spécifications en vigueur qui seront reprises et détaillées dans le dossier d'appel d'offres.

■ **Mise en œuvre**

- **Mise en œuvre du gabion**

Avant la mise en place des gabions, le terrain sera nivelé et dressé aux engins, afin de permettre une bonne assise. Il est recommandé de prévoir pour la pose du premier rang, une assise nivelée, compactée et inclinée selon les besoins.

La mise en œuvre du gabion se fera selon les 4 principales étapes suivantes :

1. Ouverture des fardeaux et dépliage des cages : cette opération se fera sur une surface plane et dure. Elle consiste à relever la face avant, les côtés puis la face arrière et à les attacher ensemble au moyen des extrémités des barrettes puis à mi-hauteur avec une agrafe ou une attache en fil. La même opération sera répétée avec les diaphragmes et les ligaturer aux faces avant et arrière.
2. Transport et mise en place définitive des cages montées et assemblage entre elles (bien solidariser les gabions entre eux sur toutes les arrêtes communes). L'alignement des cages sera particulièrement soigné.
3. Le remplissage peut se faire à la pelle mécanique, en prenant soin de garder la dernière cellule vide afin de faciliter la ligature de la cage suivante. Pour avoir un parement plus soigné et éviter les déformations, procéder à l'arrangement manuel du parement vu. Les plus gros moellons seront placés à la périphérie, les plus petits à l'intérieur. Ils seront fermés et reliés entre eux par de fortes ligatures de fil d'acier galvanisé, de diamètre et de qualité identiques à ceux du fil utilisé pour la confection des gabions. Les gabions seront montés et appliqués, lors de leur remplissage, aux gabions voisins déjà achevés. Une fois terminé, le nouveau gabion sera ligaturé avec ceux déjà en place et qui le jouxtent.
4. Mise en place des cages et fixation des couvercles (au terme du remplissage des cages).

- **Mise en œuvre du géotextile**

La mise en œuvre du tapis de géotextile ne doit pas précéder de plus de 48 heures, la mise en œuvre des gabions ou matelas gabionnés.

La pose des gabions et matelas gabionnés sur le géotextile pourra se faire progressivement, par déroulement successif du rouleau géotextile en fonction de l'avancement du remblai d'assise et par unité de largeur de gabion ou de matelas.

Il pourra être interposé à la pose des gabions et matelas gabionnés une couche de matériaux fins limono - sableux exempts totalement de roche et granulat pour éviter le poinçonnement du géotextile et son déchirement à la pose des cages.

Le blocage en pied et en crête des tapis géotextiles sera effectué en fouille ou sous remblais de matériaux limoneux bien compactés.

- **Renforcement du remblai**

Les gabions cage seront munis d'un système de type Terramesh destiné à renforcer l'ancrage et la stabilité du mur et à consolider le remblai.

L'image suivante montre un élément du système Terramesh et illustre une des applications possible intégrant un renfort de géogrille de haute résistance.

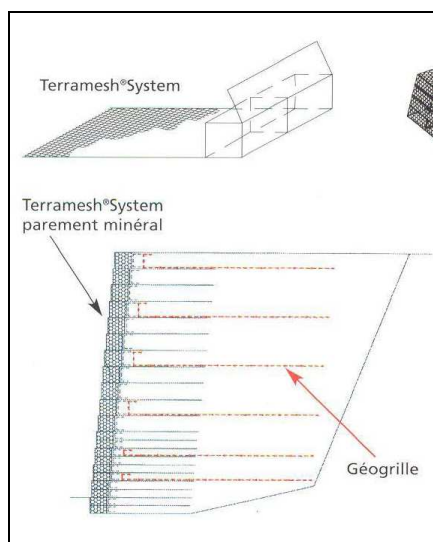


Figure 7 : Illustration du Terramesh System

7.3.3 Ouvrages en remblai

Certaines solutions de protection consisteront à réaliser des digues de retenue et à procéder à un remblai de l'espace situé entre les ouvrages et les berges. Les spécifications résumées ci-après concerneront ces types de travaux.

■ **Matériau pour le corps de la digue et les remblais de terre**

Il est constitué d'un apport de remblai en terre compacté, imperméable provenant des zones d'emprunt agréées par le maître d'œuvre. Ce dernier proposera des zones d'emprunt à l'entrepreneur comme éléments d'étude et de documentation. Celles-ci seront situées au voisinage du lieu de mise en œuvre et auront une capacité suffisante pour pouvoir réaliser la totalité des travaux (qualité & quantité).

■ **Matériau de recharge**

Les résultats de l'analyse de sols de fondation permettront de confirmer les besoins en matériaux de recharge.

Les recharges d'amélioration des conditions de fondation des ouvrages de génie civil et d'emprise de la digue dans les terrains argileux ou vaseux seront effectuées en matériau provenant des zones d'emprunts agréées par le maître d'œuvre.

■ **Matériau latéritique pour crêtes**

Eventuellement, une protection peut être prévue pour la digue. La protection de la crête de la digue sera effectuée en tout venant graveleux latéritique provenant des carrières environnantes et ayant reçu l'agrément du maître d'œuvre avant leur mise en exploitation.

■ **Système de drainage**

La digue disposera d'un drain axial vertical prolongé vers le pied de talus extérieur (zone hors batillage) et d'un drain horizontal. Ce drain sera constitué de matériaux sableux. Ce drainage va prévenir les infiltrations sauvages et les trous de « renard ».

■ **Protection des parements et de la crête**

La protection du talus (amont) en contact avec l'eau est prévue. Elle est constituée d'une couche de moellons de 15 à 30 cm de diamètre jointés entre eux par un mortier de ciment dosé à 200 kg/m³. Cette protection va recouvrir couvrant tout le parement de la digue adjacent au fleuve.

La protection du talus aval (opposé au fleuve) est prévue. Elle est constituée d'une couche de 15 cm de latérite, uniformément étalée et bien compactée sur tout le parement aval de la digue. Le pied du talus sera recouvert d'un enrochement sec par des blocs de pierres.

La crête de la digue est protégée par une couche latéritique de 15 cm de latérite, uniformément étalée et bien compactée mise en place sur la partie supérieure de la digue.

7.4 Analyse comparée des options et évolution des coûts

L'analyse est basée sur les volumes des ouvrages selon le type et les variantes. La comparaison des coûts est faite à partir de la détermination d'un prix unitaire moyen.

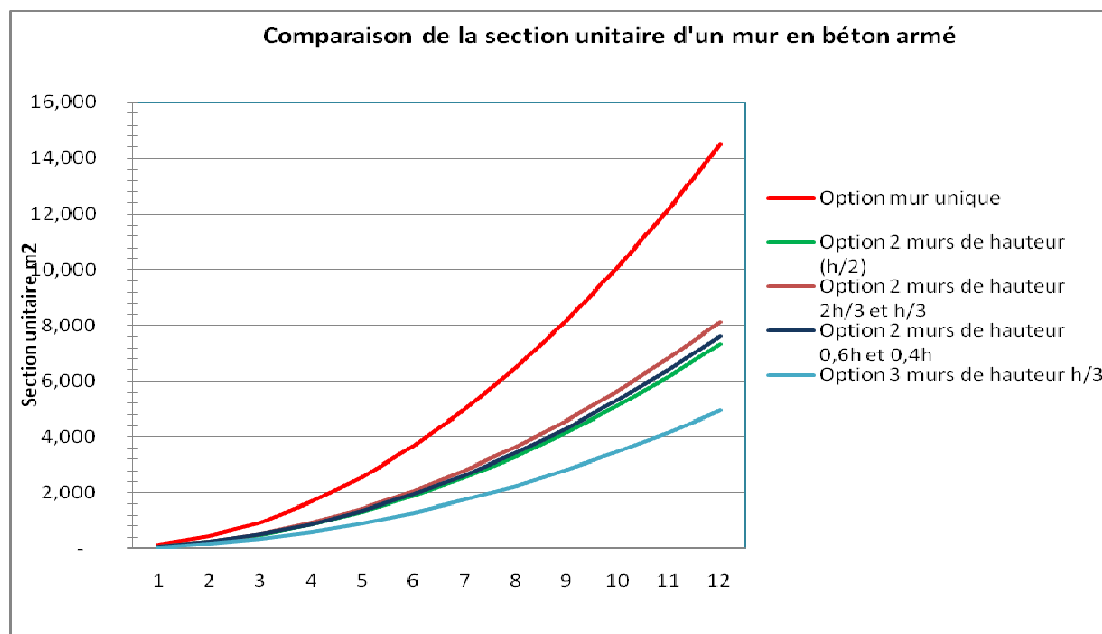
7.4.1 Evolution des volumes en fonction de la hauteur de l'ouvrage

7.4.1.1 Ouvrages en béton armé

Le mur de soutènement en béton armé a une surface unitaire fonction de la hauteur qui évolue selon une relation polynomiale d'ordre 2. L'équation définie sur la base des principes de prédimensionnement est de type : $V_u = 0,017 \cdot h + 0,099 \cdot h^2$ avec :

- V_u = volume unitaire en m³
- h = la hauteur totale de l'ouvrage en m.

En faisant varier la hauteur de l'ouvrage, la section évolue de façon très significative. Le graphique suivant illustre l'évolution du volume unitaire pour un ouvrage réalisé sur plusieurs niveaux.



Graphique 2 : Evolution de la section unitaire des murs de béton sur plusieurs niveaux

En réalisant un mur unique sur une hauteur de 12 m, la section unitaire est de 14 m². Cette section est réduite de près de moitié pour un mur réalisés sur 2 niveaux, de hauteur h variable (h/2, 2h/3 et h/3, 0,6h et 0,4h).

Lorsque l'ouvrage est réalisé sur 3 niveaux, au tiers de la hauteur totale, la section unitaire est réduite de 66%. Des économies importantes en volume sont réalisées mais il convient de situer les surcoût en termes de préparation des assises.

7.4.1.2 Ouvrage en gabion

Le profil type adopté pour le mur de gabion est vertical à section constante. La variation de la hauteur n'entraîne aucune incidence sur la section et le volume unitaire de l'ouvrage. De même, la réalisation de l'ouvrage sur plusieurs niveaux n'entraîne aucune économie.

7.4.1.3 Digue

Le profil type de la digue considéré dans la présente étude présente les caractéristiques suivantes :

- Hauteur de 1 à 12 m ;
- Pente des talus de 1/2 ;
- Largeur crête ouvrage de 3 m.

Le calcul des sections et volumes unitaires montre une relation proche de celle du mur en béton armé, de type polynomiale d'ordre 2 ($V_u = 2.h^2 + 3.h$).

L'évolution du volume unitaire en fonction de la hauteur est plus marquée (selon la même tendance) que celle concernant le mur en béton armé.

La réalisation d'un ouvrage sur plusieurs niveaux pourrait occasionner des économies de volume importantes pouvant cependant entraîner des surcoûts lors de la préparation des emprises.

7.4.2 Incidences sur les volumes de remblai à mettre en place

La réalisation des ouvrages sur plusieurs niveaux entraîne une réduction de moitié (pour 2 murs de hauteur $h/2$) et au tiers (pour 3 murs de hauteur $h/3$) du volume de remblai entre les berges et le corps des ouvrages.

La réalisation sur 3 niveaux impose une emprise plus importante rendue nécessaire par le décalage à observer en tenant compte des dimensions des semelles de fondations. La réalisation sur 2 niveaux semble plus adaptée et plus conforme à la configuration des berges du fleuve (la hauteur ne dépasse guère 12 m).

7.4.3 Comparaison des coûts

7.4.3.1 Détermination et structure des coûts moyens

Les prix moyens des ouvrages ont été déterminés en tenant compte des prix offerts lors d'appels d'offres récents, au Mali et au Sénégal et ayant porté sur des travaux similaires (protection des berges du fleuve Niger à Bamako, travaux d'aménagement d'axes hydrauliques au Sénégal).

Les rubriques les plus significatives des bordereaux de prix étudiés, en relation avec les travaux objet du présent rapport ont été extraits et une moyenne a été déterminée (voir tableau page suivante).

Prix moyens estimés en FCFA HT-HD.

N°	Rubrique	Unité	Source 1	Source 2	Source 3	Source 4	Source 5	Moyenne	Pourcentage des montants des travaux	Moyenne considérée
I. INSTALLATION ET REPLI										
	Installation de chantier de l'entrepreneur (en % des montants des marchés de référence)	Forfait	12,8%	14,1%	14,3%	16,1%		14,33 %	14,33%	
	Repli de chantier de l'entrepreneur (en % des montants des marchés de référence)	Forfait	1,5%	1,5%	1,9%	1,6%		1,63 %	1,63%	
II. PREPARATION ET TERRASSEMENT										
	Débroussaillage	m ²	162	168	155	185	400	214		
	Décapage	m ²	206	214	380	209		252		
	Abattage d'arbres de circonférence > 1,20m	Unité	82 527	85 536	78 524	86 900	25 000	71 697		
	Remblai provenant de déblai	m ³	2 630	1 653	3 500	3 270		2 763		
	Remblai provenant d'emprunt	m ³	5 286	5 479	12 725	3 740		6 807		
	Déblais à sec de grande masse	m ³	3 000	1 982	1 819	1 360	1 600	1 952		
III. GENIE CIVIL										
	Démolition partielle d'ouvrage	m ³	84 844	87 938	80 729	95 700		87 303		
	Démolition totale d'ouvrage	m ³	6 000	6 000	79 900	5 640		24 385		
	Déblai pour fondation d'ouvrage	m ³	6 000	7 913	7 265	5 640		6 705		
	Fouilles pour fondation d'ouvrages	m ³	6 500	6 500	6 500		2 800	5 575		
	Remblai compacté pour digue	m ³	7 002	7 257	6 662	3 300	3 500	5 544		15 000
	Béton de propreté dosé à 150 kg de ciment	m ³	65 000	89 139	81 832	119 000	70 000	84 994		
	Béton armé dosé à 350 Kg/M3 y compris coffrage	m ³	206 205	213 724	196 203	267 000	150 000	206 626		250 000
	Acier haute résistance FeE40 pour armatures	Kg	747	774	711	1 060		823		
	Gabions et matelas gabionné pour protection	m ³	83 978	87 041	79 905	115 000		91 481		100 000
	Enrochement > 20 cm	m ²					15 000	15 000		
	Perrés maçonnés	m ²	21 141	21 911	21 000	27 900	11 000	20 590		
	Géotextile	m ²	5 067	5 252	4 822	3 720		4 715		
	Ragréage de surface de béton	m ²	34 729	35 995	35 000	17 400		30 781		

Tableau 3 : Détermination des prix unitaires moyens

Les valeurs considérées (dernière colonne) par la suite dans le calcul du coût des ouvrages ont été majorées pour tenir compte des matériaux sujétions supplémentaires tels que :

- la mise en place du géotextile pour les ouvrages en gabion ;
- l'intégration des armatures et des fouilles pour les ouvrages en béton armé ;
- la réalisation d'un perré maçonné de protection du parement amont des remblais et digues.

7.4.3.2 Comparaison des coûts pour différentes options et variantes

En considérant les prix moyens déterminés et les différentes options et variantes présentées en annexe pour la zone d'intervention, le tableau de synthèse suivant a été dressé. Les détails des prix sont présentés dans les fiches descriptives des options.

Les données de base retenues sont les suivantes :

- hauteur totale des ouvrages : 9 et 10 m ;
- longueur des ouvrages de sous-zone du pont en 2 tracés : 144 et 155 m ;
- longueur des berges à protéger entre le pont et la centrale EDM : 300 m ;
- longueur de la digue sur la boucle située entre la centrale et le Paparah : 94 m ;
- longueur des berges au droit de la centrale : 50 m ;
- longueur des berges entre la centrale et le Paparah : 102 m ;
- la longueur complémentaire à protéger entre le pont et la centrale sur 1476 m.

Le tableau suivant fait la synthèse des coûts des différentes options et variantes définies, pour les 3 sous-zones d'intervention. Il permet de situer les combinaisons optimales qui aideront à classer les sous-zones selon un ordre de priorité, basé entre autre sur le critère de l'exposition à l'érosion et celui de l'investissement minimum.

Sous-zone	Partie	Option	Variante ou tracé	Béton armé (FCFA)	Gabion (FCFA)
Pont		Mur et remblai selon tracé 1	Mur unique	459 513 000	311 040 000
			Mur 2 niveaux	360 450 000	324 000 000
			Mur 3 niveaux	221 211 000	246 240 000
		Mur et remblai selon tracé 2	Mur unique	494 614 688	334 800 000
			Mur 2 niveaux	372 484 375	319 300 000
			Mur 3 niveaux	226 484 063	253 425 000
Centrale	Centrale	Mur et remblai	Mur unique	168 437 500	100 000 000
			Mur 2 niveaux	82 656 250	77 500 000
			Mur 3 niveaux	60 467 969	62 500 000
	Centrale à entrée Paparah	Mur et remblai	Mur unique	293 428 500	153 816 000
			Mur 2 niveaux	170 658 750	144 840 000
		Digue et remblai	Digue et remblai boucle	400 213 985	
	Digue, mur et remblai	Option mixte mur, digue et remblai	259 540 039	269 580 664	
Berge	Ancien mur à stade	Mur et remblai sur 300 m	Mur unique	876 235 295	465 610 295
			Mur 2 niveaux	364 687 500	288 750 000
			Mur 3 niveaux	322 948 674	389 140 861
	Stade à Centrale	Mur et remblai sur 1476 m	Mur unique	4 249 046 131	2 228 771 131
			Mur 2 niveaux	2 152 198 065	1 778 585 565
			Mur 3 niveaux	1 453 248 710	1 628 523 710

Tableau 4 : Récapitulatif des coût des travaux par type, options et variantes.

7.5 Combinaisons optimales

Les tableaux et graphiques suivants ont été extraits de la synthèse présentée au chapitre précédent. Ils indiquent les coûts en FCFA, des différentes combinaisons possibles tenant compte des techniques, des options et variantes et des leur emplacement

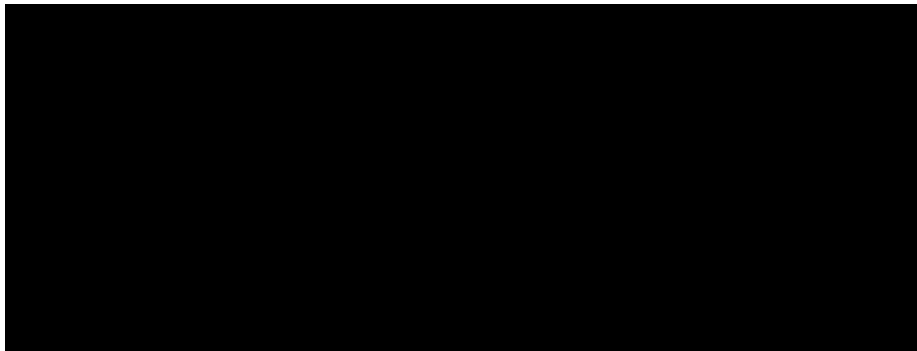


Tableau 5 : Combinaison d'options à mur unique.

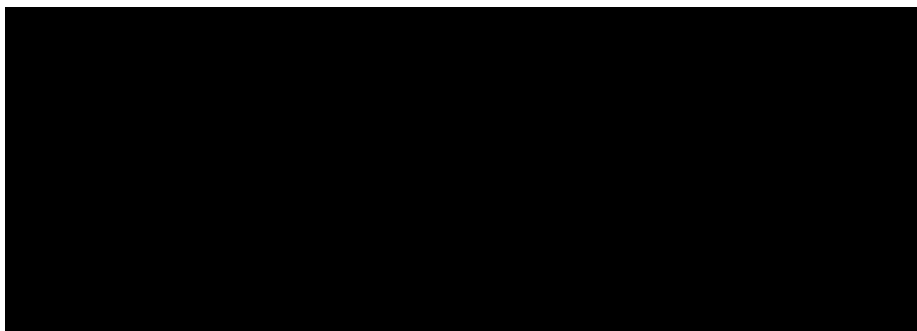


Tableau 6 : Combinaison d'options de mur à 2 niveaux.

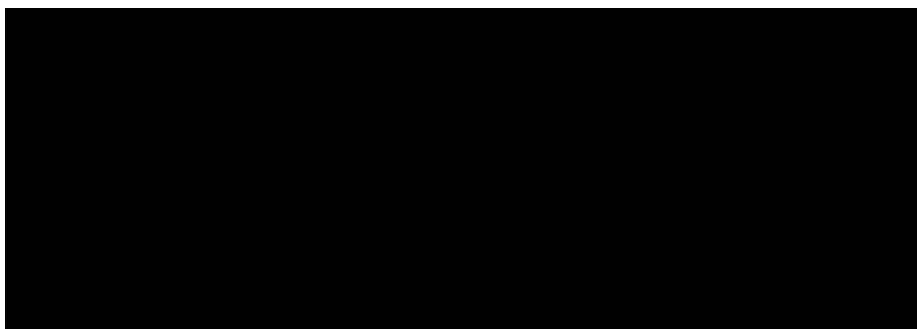


Tableau 7 : Combinaison d'options de murs à 3 niveaux avec digue et remblai.

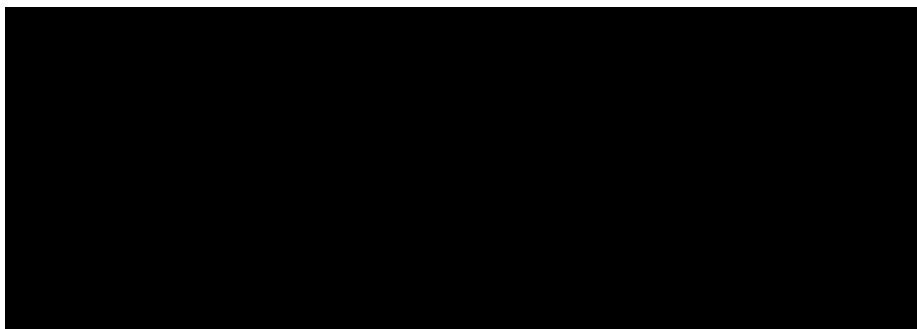


Tableau 8 : Combinaison d'options mixte de murs à 3 niveaux sur les berges et digue + mur et remblai.

En considérant les ouvrages réalisés sur 2 niveaux, la seconde combinaison est optimale avec un investissement de près d'un milliard pour l'ouvrage en béton et de 860 millions pour l'option réalisée en gabion. Ces 2 combinaisons ne comportent pas de digue en remblai au niveau de la boucle en amont de la centrale électrique.

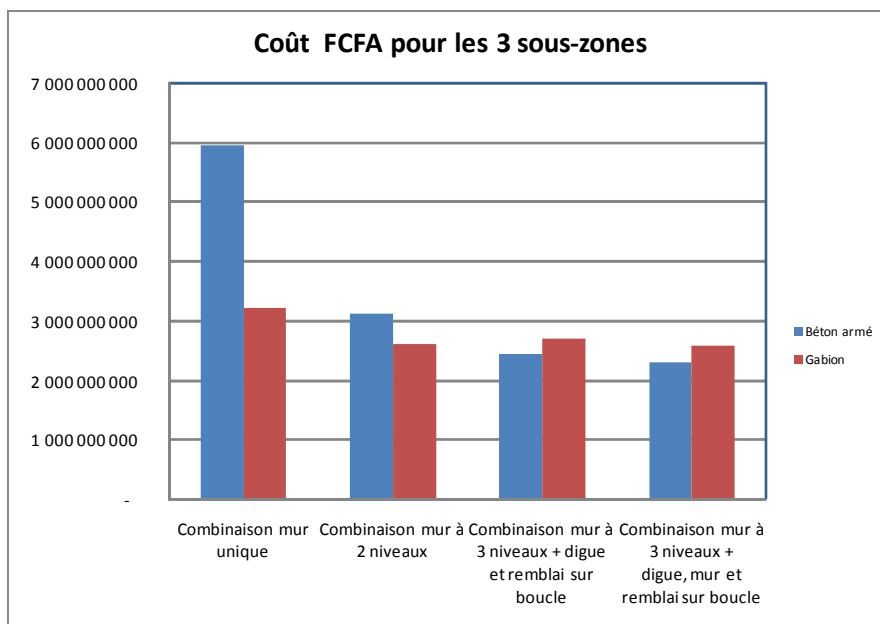
VIII. RECOMMANDATIONS DE L'ASSISTANCE TECHNIQUE

8.1 Zones prioritaires et justifications

8.1.1 Choix des zones prioritaires

La réalisation de la totalité des travaux prévus sur les 3 sous-zones nécessite un investissement important allant de 2 à 6 milliards de FCFA pour les quantités définies. Cette option consiste à réaliser des travaux de protection sur les berges du pont à l'entrée du Papanah, sur une longueur de 2072 m.

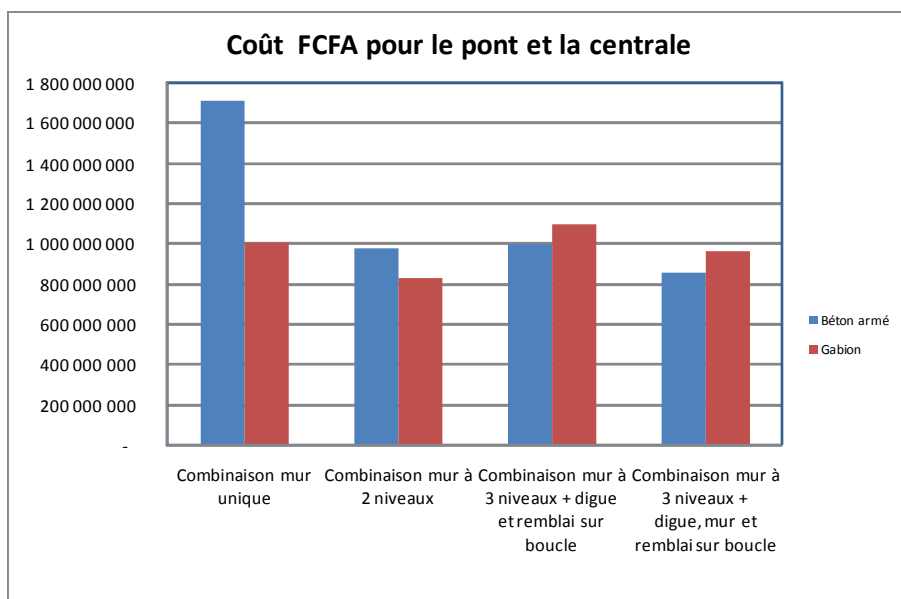
Devant la rareté des ressources financières, il est important d'opérer un choix des zones prioritaires et d'options de faisabilité les plus adaptées à l'environnement des berges.



Graphique 3 : Investissement global pour les 3 sous-zones d'intervention

Le graphique ci-dessus montre que les options les moins coûteuses concernent le gabion dont le coût global n'excède guère 3,3 milliards FCFA pour des ouvrages à un ou deux niveaux. Au-delà (réalisation sur 3 niveaux), les ouvrages en béton sont plus économiques avec un coût global situé entre 2,59 et 2,73 milliard FCFA.

En considérant uniquement les 2 sous-zones du Pont et de la Centrale et une longueur de 300 m sur les berges, le financement se situe entre 800 et 1600 millions FCFA. Les options en béton demeurant toujours moins coûteuses lorsqu'elles sont réalisées sur 3 niveaux.



Graphique 4 : Investissement pour les 2 sous-zones prioritaires

■ Investissement initial sur les 3 sous-zones prioritaires

Selon le critère financier et l'exposition à l'érosion, les travaux devraient concerner en priorité les sous-zones suivantes :

- La sous-zone du pont sur 144 m (tracé 1) ;
- La sous-zone de la Centrale sur 50 m (aux abords de la centrale) et 102 m (boucle en amont de la centrale entre celle-ci et l'entrée du Paparah) ;
- La sous-zone des berges sur 300 m (de la limite Est de l'ancien mur au stade).

La réalisation d'un mur en gabion nécessiterait un investissement de 1 milliard FCFA.

■ Investissement complémentaire

Cependant, il faut signaler qu'un traitement ponctuel des berges pourrait occasionner un affouillement encore plus important (voir les inconvénients des techniques lourdes).

Lorsque la protection des berges sur la totalité de la zone est jugée indispensable, une optimisation des investissements par la réalisation d'un mur sur 2 niveaux en gabion constituerait une solution intéressante. En effet, la réalisation d'un mur de 10 m sur 2 niveaux de 5 m chacun, sur la totalité des berges entre la limite des 300 m et la centrale (sur une distance de 1476 m incluant les 420 m occupées par l'ancien mur) occasionnerait les investissements supplémentaires de 1,778 milliard FCFA.

La réalisation d'un mur de « faible hauteur » sur toute la longueur de 1476 m peut constituer une alternative face à l'importance des investissements. Cette solution, bien qu'apportant une protection sur une hauteur de près de 50% de la hauteur moyenne des berges (5 m environs), aura l'avantage d'initier une dynamique de renforcement et d'aménagement des berges à l'image des travaux réalisés sur 600 m sur les berges du fleuve Niger à Bamako. Il faut signaler que la hauteur de cet ouvrage est inférieure à 5 m et sa largeur ne couvre pas la totalité des berges. (Voir image Google ci-après).



Figure 8 : Image de la zone aménagée sur les berges du Niger à Bamako

Cette option nécessiterait un investissement de 1,114 milliards FCFA.

8.2 Solutions techniques

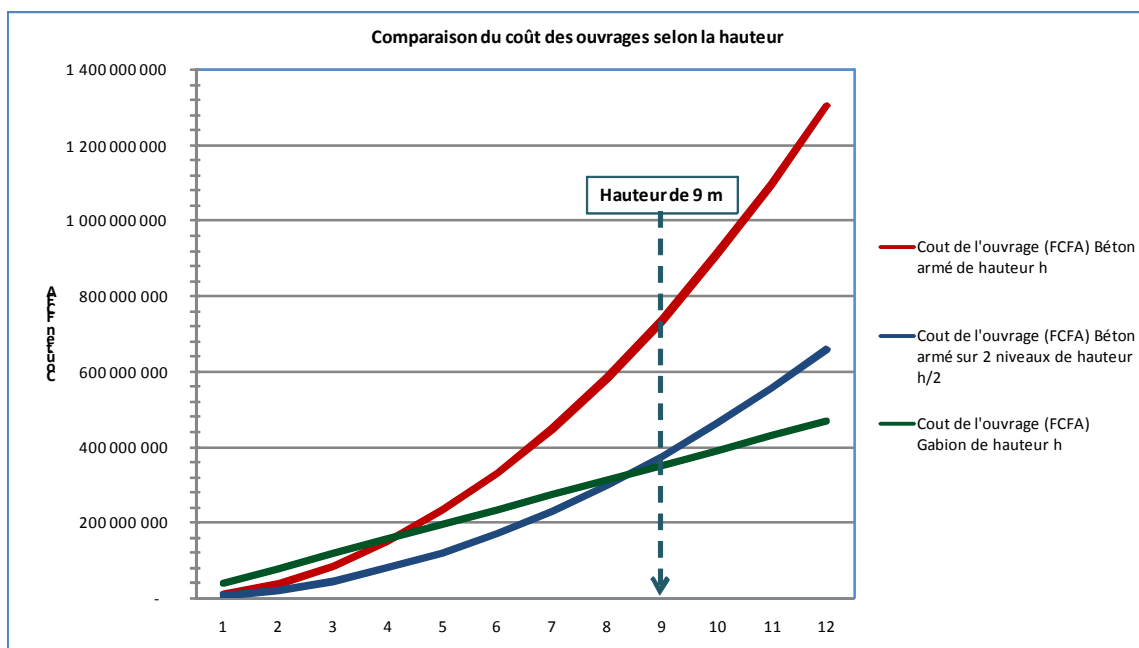
La solution technique préconisée par l'assistance technique est la réalisation d'un ouvrage de protection en gabion le long des berges. Ce choix s'explique par :

- un investissement plus faible ;
- la facilité de mise en œuvre et efficacité de la protection contre l'érosion ;
- la disponibilité de matériaux et de main d'œuvre ;
- l'intégration harmonieuse avec l'environnement et le paysage des berges (les anciens murs sont réalisés en mur de pierre) ;
- l'adaptabilité au tassement ;
- la perméabilité de l'ouvrage.

8.2.1 Choix basé sur le niveau d'investissement

La réalisation de l'ouvrage peut se faire sur 2 niveaux au plus, pour assurer mise en œuvre respectant la configuration actuelle des berges (par une réduction de l'emprise, des fouilles et de renforcement de l'assise).

Le graphique suivant montre l'évolution du coût de l'ouvrage selon la technique de réalisation (gabion ou béton armé) et la configuration de l'ouvrage (mur unique de hauteur h , mur sur 2 niveaux de hauteur $h/2$).



Graphique 5 : Comparaison des coûts des ouvrages en béton et en gabion et hauteur optimale

Le graphique ci-dessus montre l'évolution du coût d'un ouvrage de 300 m (similaire à celui prévu sur les berges entre le pont et la centrale) réalisé en béton armé et en gabion.

Le prix de l'ouvrage en béton reste légèrement inférieur à celui du mur de gabion lorsque la hauteur est inférieure à 4,5 m environ. Au-delà d'une hauteur de 4,5 m, l'option « béton armée » devient très coûteuse et croît quasi exponentiellement en fonction de la hauteur tandis que le coût de l'ouvrage en gabion reste figé entre 200 et 400 millions. A partir de cette hauteur jusqu'à une limite estimée à 8,5 m, l'option la moins coûteuse consiste à réaliser un mur en béton armé sur 2 niveaux (en gradin). Le coût d'un ouvrage de gabion sur un niveau reste toujours inférieur à ceux des ouvrages de béton à partir de 8,5 m.

8.2.2 Choix base sur les autres critères

Un des critères important pouvant influencer le choix du type d'ouvrage est la modification du régime hydraulique sur les berges protégées. La déstabilisation des berges en amont, en aval et sur les rives opposées par une réduction de la rugosité serait plus marquée avec la réalisation d'ouvrages de béton armé à parement lisse.

Cet inconvénient des murs de béton armé amène à orienter le choix vers les murs de gabion, dont la rugosité serait plus importante.

8.3 Procédure d'élaboration du dossier d'appels d'offres

8.3.1 La démarche globale

L'élaboration du dossier d'appel d'offre passe nécessairement par le choix définitif des zones à protéger et des techniques à mettre en œuvre. Les tâches prévues au terme de cette étape de sélection seront exécutées dans l'ordre suivant :

- définition du cahier des prescriptions techniques : elle s'appuie sur les techniques à mettre en œuvre.
- Elaboration du bordereau des prix unitaires : sur la base des spécifications techniques, des différents éléments de prix à considérer seront définis et complétés.

- Elaboration du devis quantité estimatif : les données topographiques portant sur les sites retenus et les sous-détails de prix issus de la revue documentaire serviront de base de travail.
- Mise au format Banque Mondiale : cette étape ultime de la confection du DAO sera réalisée en collaboration avec les experts de l'OMVS.

8.3.2 La prise en compte des études complémentaires

La réalisation des études topographiques a permis de quantifier les travaux à réaliser et de prédimensionner les ouvrages. Cependant, la conception globale des ouvrages requiert la prise en compte des données hydrauliques, hydrologiques et géotechniques portant sur les sols de fondation.

■ Collecte de données complémentaires

La collecte des données hydrauliques et hydrologique peut se faire avec l'appui de l'OMVS et des services nationaux compétents. La connaissance du régime du fleuve peut être affinée par le traitement des données collectées. Cette tâche peut être exécutée par l'Assistance Technique en appui à la Cellule de Coordination du projet GEF en vue de lui permettre de fournir les données nécessaires à la conception finale des ouvrages.

■ Etudes complémentaires

La réalisation de l'étude géotechnique par compte peut se faire dans le cadre des études d'exécution et des investigations complémentaires réalisées par l'Entrepreneur pour définir entièrement ses travaux conformément aux spécifications du Cahier des Prescriptions Techniques (CPT). Cette tâche comprend les prestations suivantes :

- les investigations complémentaires relatives aux travaux topographiques (polygonale et son rattachement au réseau national en X,Y et Z), ainsi que les levés topographiques de détail pour la construction des ouvrages d'art, des carrefours et autres aménagements;
- les investigations complémentaires relatives aux travaux géotechniques (sondages manuels et/ou sondages carottés), ainsi que les essais de laboratoire pour la définition complète du niveau de fondation des ouvrages d'art, la mise en œuvre des terrassements et notamment le remblai armé, ainsi que tous les autres aménagements;
- les plans d'implantation de l'axe de l'ouvrage à construire avec le piquetage des profils ;
- les plans et profils en long du projet implanté et piqueté sur le terrain ;
- les plans d'implantation des ouvrages d'art, ouvrages d'assainissement et autres aménagements à construire pour l'ensemble du projet
- les cubatures définitives des mouvements de terrassement du projet (déblais mis en remblai, déblais mis en dépôt définitif et remblai d'emprunt) ;
- le projet d'exécution complet relatif aux ouvrages et au remblai y compris les calculs de stabilité ;
- le projet d'exécution éventuel des ouvrages d'assainissement ou de franchissement à construire en béton armé (prolongement du collecteur des eaux usées, évacuation des eaux de ruissellement, dispositif de drainage du remblai, renforcement de la route longeant les berges, ouvrages d'accès aux berges....), notamment les

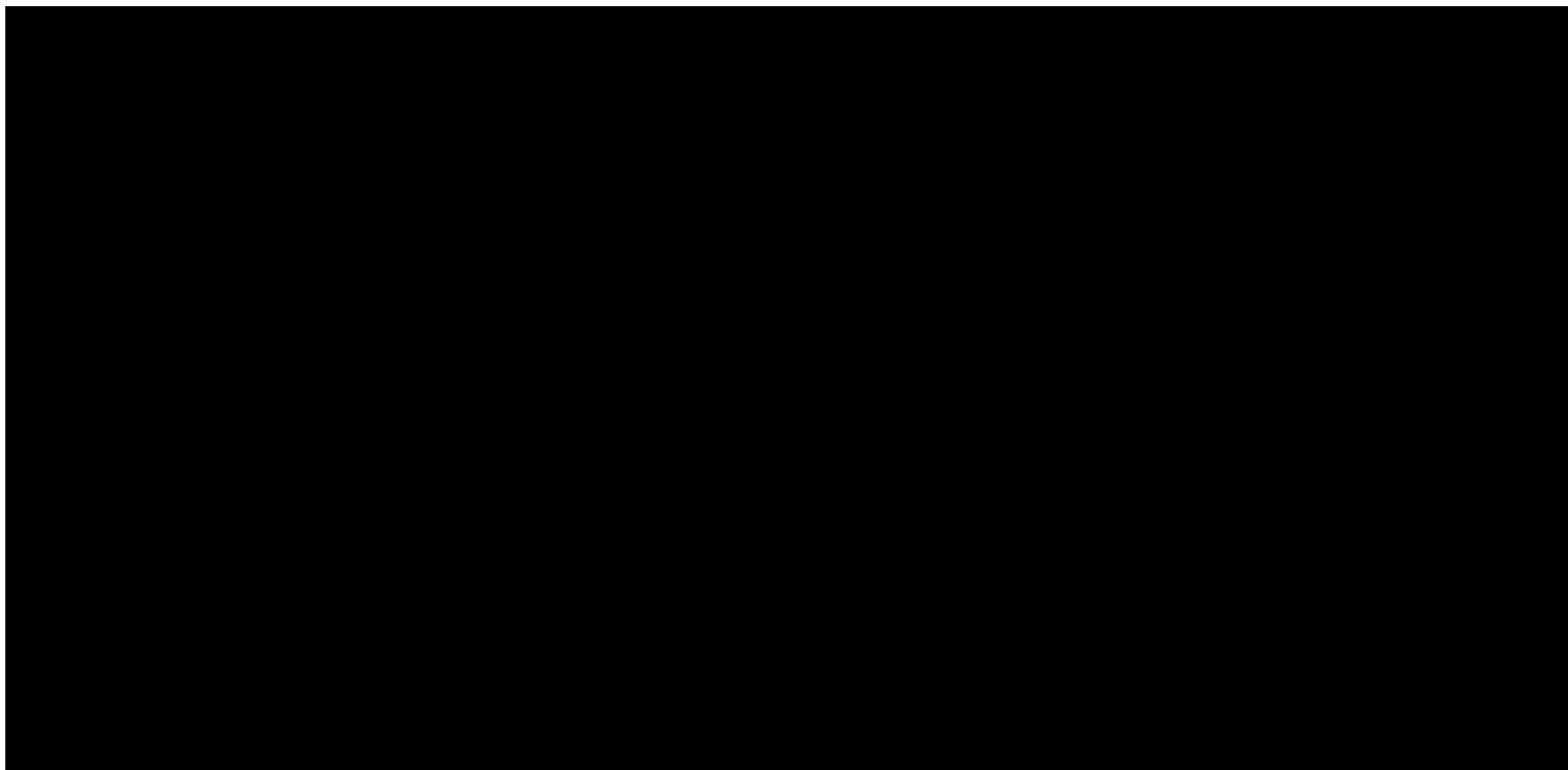
dispositifs pris pour le coffrage, le ferrailage, le bétonnage, ainsi que les notes de calculs (fondations et structures).

Cette activité comprend au terme des travaux, l'établissement des plans « tel que construit » (plans de recollement) fournis au Maître de l'Ouvrage ou son Représentant au moment de la réception globale de l'ensemble.

8.3.3 Planning d'exécution

Le chronogramme de la phase d'identification des travaux et d'élaboration du dossier d'appel d'offres a été actualisé en tenant compte des délais nécessaires à la réalisation des études topographiques et à restitution des résultats. Il est présenté à la page suivante.

Planning d'exécution



IX. CONCLUSIONS

La réalisation des travaux de protection des berges à hauteur de Kayes constituent une priorité pour les autorités maliennes. La rédaction du présent rapport est destinée à préciser la problématique de l'érosion et de l'instabilité de berge et de leur protection et à fournir des éléments d'appréciation permettant un choix judicieux des zones à protéger et des techniques à mettre en œuvre.

Le rapport présente plusieurs options de protection, parmi lesquelles, la réalisation d'ouvrages en gabion ou en béton armé sur 2 niveaux, paraissent les plus adaptées et plus économiques. Cette suggestion tient compte des résultats de l'analyse découlant de la définition, du prédimensionnement et de l'évaluation des investissements nécessaires.

Les annexes proposées présentent de façon détaillée les différentes options et variantes ainsi que les coûts principaux auxquels il est prévu d'associer les autres éléments de prix composant le bordereau des prix unitaires.

Il convient de donner une suite au présent rapport par l'amélioration de son contenu grâce après l'analyse critique par les acteurs nationaux et les experts de l'OMVS impliqués dans la mise en œuvre du projet GEF. Concomitamment, une meilleure définition de la structure des éléments du dossier d'appel d'offres et des prix estimatifs se feront sur la base des informations complémentaires attendues.

L'élaboration complète du DAO reste cependant tributaire des résultats de la restitution prévue de l'étude, à partir de laquelle, les zones prioritaires et les options techniques seront définitivement arrêtées.

Revue documentaire : liste des documents consultés et source

La rédaction du présent rapport d'étude a nécessité des investigations et une revue de la documentation portant sur les techniques préconisées et les travaux d'aménagement des berges. La revue porte sur des documents et expériences diverses au niveau national, régional et international. Certaines illustrations et descriptions ont été tirées de cette documentation.

1. ANOCI – Sénégal. Dossier d'Appel d'Offres pour l'élargissement de la Corniche Ouest : Tronçon stèle Mermoz –Carrefour des Madeleines.
2. ANOCI- Sénégal. Dossier d'Appel d'Offres travaux de construction de route : Tronçon 1 et 2 : Cabinet Atepa –Mosquée de la Divinité et Mosquée de la Divinité –Mamelles.
3. ALKOR DRAKA S.A : Etanchéité des bassins, canaux et ouvrages assimilé par géomembranes Alkor Draka, CCT.
4. PDMAS – SAED- OMVS. Sénégal. Dossier d'Appel d'Offres des travaux de génie civil, des ouvrages de terrassement et de pose de conduite.
5. République du Niger-UE. Dossier d'Appel d'Offres pour le rechargement de pistes.
6. Hesco. CCPT de gabions Hesco.
7. France Gabion. Bordereau des prix unitaires type de France Gabion.
8. Aqua Terra. Rapport d'étude de définition des préalables à l'utilisation de la terre armée au cas de la Rocade Méditerranéenne.
9. Aqua Terra Solution. CCTP type de gabion électrosoudé, de fascines, de géonattes, de radeaux végétalisés, de plantes en milieux humides, de semences sur berges et talus, de bionattes, de géofiliets, de géotextiles, de géocomposites tridimensionnels et géoalvéolaires.
10. Rapport d'étude. Les géosynthétiques en protection contre l'érosion des berges et en construction d'ouvrages hydrauliques et maritimes. A. KOFFLER, A. BENDRISS, E. ZENGERINK.
11. Cubus Engineering Software. Documentation géotechnique : mur de soutènement, enceinte de fouille et stabilité.
12. Agence de l'Eau Seine Normandie : Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Typologie des opérations de restauration et éléments techniques.
13. SETRA. Typologie des ouvrages de soutènement.
14. Aqua Terra. Documentation sur la défense des berges, seuils et petits barrages. Techniques lourdes et solutions douces.
15. ADETS. Association Technique pour le Développement du Treillis Soudé. Chapitre 5 : le Mur de Soutènement.
16. Agence Régionale pour l'Environnement Rhône-Alpes, INP-ENSEEHIHT Toulouse-Intranet du BEI. Rapport d'étude sur l'Aménagement des berges.
17. Logiciel CYPE. Dimensionnement des murs de soutènement.
18. Articles de presse : Aménagement des berges du fleuve Niger à Bamako.
19. France Gabion. Guide général des solutions pour l'environnement.
20. France Gabion. Maccafferri. Aménagement hydraulique / Ouvrages longitudinaux.
21. USA. HEC 11. Design of Riprap Revetment.
22. Mali. Rapport sur la préservation : gestion des ressources naturelles/ DCN. Fiches d'identification des travaux de protection des berges du fleuve Niger/ sauvegarde de Diafarabé.