

D. N° 0400 08792

**ORGANISATION POUR LA MISE
EN VALEUR DU FLEUVE SENEGAL
O.M.V.S.**

10.109

**ETUDES D'EXECUTION DU PROJET
D'AMENAGEMENT DU FLEUVE SENEGAL
POUR LA NAVIGATION**

Mission A. 1.5: Définition des Travaux d'Aménagement
Tome I: Rapport

GROUPEMENT D'INGENIEURS-CONSEILS

Prof. Dr. Lackner & Partner
Brême, R.F.A.

Dorsch-Consult
Munich, R.F.A.

Electrowatt
Zurich, Suisse

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
1. <u>Résumé</u>	1 - 1
1.1 Généralités	1 - 1
1.2 Données de base du projet	1 - 2
1.3 Travaux d'aménagement	1 - 2
1.4 Incidences du débit sur le mouillage utilisable	1 - 5
1.5 Ampleur des travaux	1 - 5
1.6 Coûts des travaux	1 - 7
1.7 Proposition pour le projet d'exécution à élaborer	1 - 10
2. <u>But de l'étude</u>	2 - 1
3. <u>Exposé général pour l'aménagement d'un fleuve</u>	3 - 1
3.1 Le lit naturel d'un fleuve	3 - 1
3.1.1 Généralités	3 - 1
3.1.2 Méandres du fleuve	3 - 2
3.1.3 Méandres du talweg	3 - 6
3.2 Aménagement du lit d'un fleuve	3 - 7
3.2.1 Aménagement du lit mineur	3 - 8
3.2.2 Aménagement du lit au débit en basses eaux	3 - 8
3.2.3 Aménagement du lit majeur	3 - 9
3.2.4 Réalisation et incidences de l'aménagement d'un fleuve	3 - 9
3.3 Méthodes d'aménagement du fleuve	3 - 12
3.4 Canalisation d'un fleuve	3 - 14
4. <u>Travaux d'aménagement et ouvrages</u>	4 - 1
4.1 Travaux de dragage	4 - 1
4.2 Travaux de dérochement	4 - 1
4.3 Ouvrages	4 - 2

	<u>Page</u>
4.3.1 Epis	4 - 2
4.3.2 Diques	4 - 14
4.3.3 Panneaux de surface	4 - 17
4.3.4 Epis de fond et panneaux de fond	4 - 20
5. <u>Bases du projet pour l'aménagement du fleuve</u> <u>Sénégal</u>	5 - 1
5.1 Généralités	5 - 1
5.2 Débits de régularisation et de référence	5 - 2
5.2.1 Débits de régularisation conformément à l'étude du Groupement Manantali	5 - 2
5.2.2 Débit de référence pour le projet	5 - 5
5.3 Profondeur du chenal navigable et enfoncement	5 - 5
5.4 Largeur du chenal navigable et rayons des courbes	5 - 9
5.4.1 Unités de bateaux prévues	5 - 9
5.4.2 Largeur du chenal navigable	5 - 10
5.4.3 Elargissement dans les courbes	5 - 11
5.4.4 Relation entre la profondeur et la largeur du chenal navigable	5 - 14
5.4.5 Choix de la largeur du chenal	5 - 18
5.4.6 Talus du chenal navigable	5 - 19
5.5 Débits moyens et débits de crue	5 - 19
5.5.1 Débits moyens	5 - 20
5.5.2 Débit de crue	5 - 20
5.5.3 Plus hautes eaux navigables	5 - 20
5.6 Tirant d'air	5 - 21

	<u>Page</u>
5.6.1 Tirant d'air au-dessous des ponts	5 - 21
5.6.2 Tirant d'air au-dessous des lignes aériennes	5 - 21
5.6.3 Recouvrement d'ouvrages et de conduites dans le lit du fleuve	5 - 22
5.7 Résumé des données du projet	5 - 23
5.7.1 Débits et hauteurs des eaux	5 - 23
5.7.2 Dimensions du chenal navigable	5 - 24
6. <u>Avant-projet pour les travaux d'aménagement</u>	6 - 1
6.1 Données de base	6 - 1
6.1.1 Données hydrologiques	6 - 1
6.1.2 Données topographiques	6 - 2
6.1.3 Données géologiques et de la mécanique des sols	6 - 3
6.1.4 Autres données	6 - 3
6.2 Moyens pour l'étude du projet	6 - 3
6.2.1 Modèle mathématique	6 - 3
6.2.2 Modèles hydrauliques	6 - 7
6.3 Tracé du chenal navigable	6 - 9
6.3.1 Talweg	6 - 9
6.3.2 Axe du chenal navigable	6 - 9
6.4 Explications relatives à l'avant-projet	6 - 10
6.4.1 Généralités	6 - 10
6.4.2 Division du fleuve en tronçons	6 - 12
6.4.3 Embouchure en aval de St-Louis	6 - 12
6.4.4 St-Louis (PK 0) à Leboudou-Doué (PK 244)	6 - 14

6.4.5	Leboudou-Doué (PK 244) à Vending (PK 489)	6 - 22
6.4.6	Vending (PK 489) à Matam (PK 637)	6 - 36
6.4.7	Matam (PK 637) à Bakel (PK 816)	6 - 47
6.4.8	Bakel (PK 816) à Ambidédi (PK 905)	6 - 57
6.4.9	Ambidédi (PK 905) à Kayes (PK 948)	6 - 67
6.4.10	Bras Doué (PK 0 à PK 228)	6 - 74
6.4.11	Travaux à réaliser	6 - 81
7.	<u>Mouillages disponibles en fonction du débit et de la cote de la retenue du barrage de Diama</u>	7 - 1
7.1	Généralités	7 - 1
7.2	Augmentation du mouillage pour le débit du mois de janvier	7 - 3
7.3	Mouillage pendant la phase transitoire, PT1	7 - 5
7.4	Incidences de la cote de retenue de +2,5 m IGN du barrage de Diama sur les mouillages	7 - 7
8.	<u>Volume des travaux à effectuer</u>	8 - 1
8.1	Volume des travaux selon des études antérieures	8 - 1
8.1.1	Volume des travaux selon Beziukov	8 - 1
8.1.2	Estimation des volumes par le Groupement Manantali	8 - 4
8.2	Volume des travaux conformément à la des- cription des prestations indiquée à l'ar- ticle 6	8 - 6
8.2.1	Généralités	8 - 6
8.2.2	Dragage et dérochement	8 - 7
8.2.3	Ouvrages de correction	8 - 22

	<u>Page</u>
9. <u>Matériel à mettre en service et déroulement des travaux</u>	9 - 1
9.1 Généralités	9 - 1
9.2 Matériel à mettre en service	9 - 2
9.2.1 Matériel de dragage	9 - 2
9.2.2 Dérochement	9 - 5
9.2.3 Exécution des travaux et matériel pour la construction d'ouvrages de correction	9 - 8
9.2.4 Remblaiement des affouillements	9 - 11
9.3 Planning d'exécution des travaux	9 - 11
9.3.1 Dragages	9 - 11
9.3.2 Dérochement	9 - 12
9.3.3 Ouvrages de correction	9 - 12
10. <u>Coûts de construction</u>	10 - 1
10.1 Coûts de dragage	10 - 1
10.2 Coûts de dérochement	10 - 5
10.3 Coûts de construction des ouvrages de correction	10 - 9
10.3.1 Généralités	10 - 9
10.3.2 Lieux d'extraction des pierres	10 - 10
10.3.3 Prix unitaires	10 - 11
10.3.4 Coûts d'installation et de dégagement des chantiers	10 - 15
10.3.5 Coûts pour l'exploitation de la carrière	10 - 16
10.3.6 Coûts de construction des ouvrages de correction	10 - 16
10.3.7 Total des coûts pour les ouvrages de correction	10 - 19

	<u>Page</u>
10.4 Coûts de construction pour les solutions alternatives, comparaison des prix	10 - 21
10.4.1 Epis en sacs en matière plastique à Dioudé Diabé	10 - 21
10.4.2 Diawara	10 - 23
10.4.3 Boghé	10 - 24
10.4.4 Bakel	10 - 25
10.4.5 Influence du barrage de Diama sur les coûts d'aménagement	10 - 26
10.5 Etat des coûts	10 - 28
11. <u>Proposition pour le projet d'exécution et des études à élaborer ultérieurement</u>	11 - 1
11.1 Proposition pour le projet d'exécution	11 - 1
11.2 Etudes à élaborer ultérieurement	11 - 3
12. <u>Aménagement du chenal navigable en vue de la phase transitoire</u>	12 - 1
12.1 Avant-propos	12 - 1
12.2 Volume des travaux de dragage et de dérochement	12 - 2
12.3 Déroulement des travaux	12 - 3
12.4 Coûts de construction	12 - 4
12.5 Profondeurs d'eau au cours de la phase définitive de régularisation	12 - 8
12.6 Facteurs de sécurité relatifs à la profondeur d'eau	12 - 9
12.7 Tirants d'air et hauteurs des recouvrements	12 - 11

1. Résumé

1.1 Généralités

Le présent rapport sur la Mission A.1.5 "Définition des travaux d'aménagement de la voie navigable" comprend:

- La description générale des caractéristiques d'un fleuve naturel alluvial et des principes à respecter lors de son aménagement.
- La description et l'explication des méthodes applicables pour l'aménagement d'un fleuve.
- Une description générale des travaux et ouvrages, y compris de leur effet, leur conception ainsi que de leurs avantages et désavantages.
- Les données de base du projet pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation.
- La description des différents tronçons du fleuve Sénégal et du Doué ainsi que des travaux d'aménagement requis pour différents mouillages à aménager.
- Des études sur les incidences des différents débits sur le mouillage utilisable.
- La détermination des volumes de dragage et de dérochement pour différents mouillages ainsi que de l'ampleur des ouvrages de correction.
- La description de l'exécution et du déroulement des travaux, y compris celle du matériel à mettre en oeuvre.

- Les coûts des travaux pour différents mouillages.
- Une proposition pour le projet d'exécution à élaborer.

1.2 Données de base du projet

Les données de base de l'avant-projet sont:

- Les débits
 - . de l'écoulement du mois d'avril selon le cas N° 7 du Groupement Manantali et
 - . de l'écoulement du mois de juin de la phase transitoire PT 1 du Groupement Manantali.
- Une largeur de chenal permettant la circulation sur deux voies des convois M3, avec $B = 55$ m pour des rayons $R \geq 1\ 000$ m et une largeur allant jusqu'à $B = 95$ m pour $R = 200$ m.
- Un mouillage à aménager (mouillage de référence) de 1,4 m, 1,9 m et 2,4 m pour le cas N° 7 ainsi que de 1,9 m pour la phase transitoire, et un enfoncement qui est de 0,4 m inférieur au mouillage de référence.
- Un supplément relatif au mouillage à aménager pour couvrir les tolérances lors des mesurages et le calcul hydraulique et les modifications du fond de fleuve, et qui est de l'ordre de 0,30 m pour un fond sablonneux et de 0,45 m pour un fond rocheux.
- Les pentes suivantes de talus du chenal navigable:
 - . 1:5 pour des talus non protégés
 - . 1:3 pour des talus protégés et
 - . 1:1 pour des secteurs rocheux.

1.3

Travaux d'aménagement

Le chenal navigable requis pour la navigation doit être réalisé par dragage et dérochement. L'exécution d'ouvrages de correction dans le cadre des travaux à mettre au concours n'est prévue que pour des secteurs critiques pour lesquels des travaux d'entretien importants peuvent être escomptés. Ce sont d'après l'ordre de leur importance:

- Goutioubé
- Khabou
- Goumal
- N'Guidjilone
- Koundél
- Dioudé Diabé
- Koungani
- Digokori
- Somone.

D'autres travaux de correction pour les secteurs, qui ne sont pas compris dans la première phase, peuvent être réalisés ultérieurement par la Direction de la Voie Navigable.

Le tableau 1.3 donne une vue d'ensemble des travaux de correction.

Tableau 1.3: Travaux à mettre au concours

Tronçon	Travaux à exécuter			Ouvrages			
	Dragage	Déroctage	Ouvrage	PK de à	Emplacement	But et nature de l'ouvrage	Remarque
Chenal d'accès à St-Louis	Des dragages et ouvrages à exécuter dans le cadre de la construction du port de St-Louis						Ne fait pas partie de cette étude
St-Louis à Leboudou-Doué PK 0 - 244	Seulement pour des caboteurs	Non	Non	26	Diamal	Barrage et écluse	Ne fait pas partie de cette étude
Leboudou-Doué à Vending PK 244 - 489	Pour les bateaux fluviaux seulement en amont de Podor	Oui	Oui	439 - 443	Dioudé Diabé	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander
				454,3-455,4	Diamel-Vidimé	Protection de la berge gauche	Facultatif
				382 - 385	Boghé	Fermeture du bras secondaire	Facultatif
Vending à Matam PK 489 - 637	Oui	Oui	Oui	541 - 546	Kaédi	Protection de la berge droite	Facultatif
				583 - 587	N'Guidjilone	Epis et digues pour la fermeture du bras secondaire	A recommander
				614	Koundél	Digues pour la fermeture du bras secondaire	A recommander
Matam à Bakel PK 637 - 816	Oui	Oui	Oui	718 - 720	Goumal	Construction des épis pour la protection du chenal navigable et comme modèle pour ce tronçon	A recommander
				814 - 816	Bakel	Protection de la berge droite, ou mieux construction et protection d'un nouveau chenal navigable avec des épis	Facultatif
Bakel à Ambidédi PK 816 - 905	Oui	Oui	Oui	825 - 829	Koungani	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander
				845 - 851	Goutioubé	Embouchure de la Falémé: Construction d'une digue pour guider le courant de la Falémé dans la direction du fleuve Sénégal	Obligatoire
				862 - 871	Khabou	Protection du chenal avec des ouvrages	Obligatoire
				877 - 880	Digokori	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander
				891 - 897	Somone	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander
Ambidédi à Kayes PK 905 - 948	Oui	Oui	Oui	920 - 928	Tambounané Dakandaké	Construction d'un chenal navigable par déroctage et dragage et, alternativement, avec des ouvrages supplémentaires	Alternative
Bras du Doué PK 0 - 228	Des travaux ne seront pas exécutés pendant la première phase d'aménagement. Si nécessaire, des dragages peuvent être exécutés ultérieurement par la Direction.						-

1.4 Incidences du débit sur le mouillage utilisable

Les mouillages du chenal navigable aménagé à 1,90 m pour le débit au cours de la phase transitoire augmentent de 0,15 m à 0,35 m si au lieu des débits de la phase transitoire, ceux du cas N° 7 s'écoulent. Ceci signifie qu'au cas de régularisation N° 7, un mouillage utilisable d'au moins 2,05 m et un enfoncement de 1,65 m existeront sur l'ensemble du chenal navigable pendant toute l'année.

Le relèvement de la retenue normale du barrage de Diama à +2,5 m IGN n'a un effet positif sur le mouillage que sur le tronçon inférieur jusqu'aux environs de Vending.

1.5 Ampleur des travaux

Pour les mouillages à aménager de 1,4, 1,9 et 2,4 m, à l'état définitif de la régularisation et pour le mouillage de 1,9 m au cours de la phase transitoire, les volumes de dragage et de dérochement ont été déterminés pour les tronçons suivants:

- Leboudou-Doué - Vending,
- Vending - Matam,
- Matam - Bakel,
- Bakel - Ambidédi,
- Ambidédi - Kayes.

Sur le tronçon St-Louis - Leboudou-Doué, des travaux d'aménagement pour un mouillage de 2,4 m ne sont nécessaires ni pour le cas N° 7 ni pour la phase transitoire. Les bateaux prévus peuvent circuler sur ce tronçon avec l'enfoncement maximal, c'est-à-dire 2,0 m. Ceci est également valable pour des caboteurs ayant un enfoncement jusqu'à 3,5 m.

Si des caboteurs d'un enfoncement de 4,5 m doivent être mis en service jusqu'à Podor, des travaux de dragage ne seront nécessaires qu'au seuil de Bokhol (PK 186,5 à 189,0) pour une retenue normale à +1,5 m IGN du barrage de Diama. En revanche, neuf seuils devront être aménagés si la retenue de Diama n'est pas réalisée.

Les volumes de dragage et de dérochement à exécuter sur les différents tronçons pour les mouillages à aménager étudiés - y compris les volumes supplémentaires dus aux tolérances inévitables lors de l'exécution des travaux - sont récapitulés dans les tableaux 8.2.2.2 a) et 12.2 b). Le tableau 1.5 ci-après donne les volumes nécessaires pour l'aménagement du fleuve sur toute sa longueur.

Tableau 1.5: Volumes de dragage et de dérochement

Mouillage à aménager en m	Régularisation d'après	Volume de dragage en m ³	Volume de dérochement en m ³
1,4	Cas 7	660 000	268 000
1,9	Cas 7	1 822 000	629 000
2,4	Cas 7	6 992 000	1 409 000
1,9	PT 1	4 255 000	1 262 000

Le tableau 8.2.3.2 indique l'ampleur des travaux pour les ouvrages de correction des seuils étudiés.

1.6

Coûts des travaux

Les études ont montré que les prix unitaires diminuent avec l'augmentation du mouillage à aménager, car:

- le degré d'efficacité de la drague augmente avec la profondeur de dragage et
- la mise en service de plusieurs dragues a une influence favorable.

Les coûts d'installation et de dégagement des chantiers augmentent cependant considérablement lors de la mise en service d'un matériel plus important. Ceci est essentiellement dû aux coûts plus élevés de transport et de transbordement du matériel lourd.

Coûts de dragage

Les tableaux 10.1 b) et 12.4 a) donnent les coûts de dragage pour les différents tronçons en fonction du cas de régularisation, du mouillage à aménager et du matériel utilisé. Pour une mise en service de deux à trois dragues, les coûts escomptés pour toute la longueur du fleuve à aménager sont récapitulés au tableau 1.6 a) ci-dessous.

Tableau 1.6 a) : Coûts de dragage

Mouillage à aménager en m	Régulari- sation d'après	Nombre de dragues	Coûts de dragage en M.FCFA
1,4	Cas 7	2	2 500
1,9	Cas 7	3	4 800
2,4	Cas 7	3	13 200
1,9	PT 1	3	8 800

Coûts de dérochement

Les coûts de dérochement sont indiqués au tableau 1.6 b) ci-après.

Tableau 1.6 b): Coûts de dérochement

Mouillage à aménager en m	Régulari- sation d'après	Coûts en millions de FCFA
1,4	Cas 7	2 600
1,9	Cas 7	5 400
2,4	Cas 7	10 700
1,9	PT 1	9 950

Coûts des ouvrages

Les coûts des ouvrages de correction de tous les seuils sont estimés, d'après le tableau 10.5 b), à 4 650 millions de FCFA.

Total des coûts

Le total des coûts des travaux de construction pour les mouillages à aménager étudiés est donné au tableau 1.6. c).

Tableau 1.6 c) : Total des coûts de construction

Mouillage à aménager en m	Régula- risation d'après	Coûts des travaux en millions de FCFA			
		Dragage	Déroche- ment	Ouvrages	Total
1,4	Cas 7	2 500	2 600	4 650	9 750
1,9	Cas 7	4 800	5 400	4 650	14 850
2,4	Cas 7	13 200	10 700	4 650	28 550
1,9	PT 1	8 800	9 950	4 650	23 400

L'estimation des coûts des travaux est basée sur les hypothèses suivantes:

- Les travaux de dérochement entre Ambidédi et Kayes seront exécutés à partir de la rive et à sec avant la mise en service du barrage de Manantali.
- Les travaux de dragage seront effectués après la mise en service du barrage de Manantali, afin qu'un mouillage suffisant soit disponible pour la flotte de dragage pendant toute l'année.
- Les ouvrages de correction seront réalisés après le dragage du chenal navigable, afin que les pierres nécessaires pour la construction des ouvrages puissent être transportées par la voie navigable.

1.7 Projet d'exécution et appel d'offres

D'après la décision de l'OMVS, le projet d'exécution est conçu de telle façon que, porté sur le débit de la phase

transitoire PT1, un chenal navigable d'un mouillage de 1,9 m pour la navigation avec un enfoncement de 1,5 m existe sur le tronçon de St-Louis à Kayes pendant toute l'année. La largeur du chenal est déterminée par la circulation sur deux voies des convois M3.

Des travaux de correction nécessaires pour la mise en service de caboteurs en aval de Podor, ne seront pas mis au concours car ces travaux pourront être effectués en temps utile par la Direction de la Voie Navigable.

Comme l'importance du Doué est limitée à la navigation locale et que les conditions de navigation y seront améliorées grâce à l'effet régularisant du barrage de Manantali, des travaux de correction dans le Doué ne seront pas nécessaires dans un proche avenir.

2. But de l'étude

La présente étude a pour but de définir les travaux nécessaires à la réalisation d'un chenal navigable sur le fleuve Sénégal entre St-Louis et Kayes, pouvant être utilisé toute l'année. A cet effet, l'étude comprend les prestations suivantes:

- Elaboration des bases de dimensionnement d'un chenal navigable.
 - Repérage des seuils nécessitant des travaux d'aménagement. A cet effet, les débits régularisés devront être pris en considération, tout en tenant compte des prélèvements pour l'agriculture et des pertes diverses.
 - Définition du chenal navigable dans le secteur des seuils.
 - Elaboration de solutions de base pour l'aménagement pour la navigation des différents tronçons du fleuve.
 - Détermination de l'incidence des travaux d'aménagement sur les mouillages, notamment dans le secteur des seuils, pour différents débits en basses eaux.
 - Détermination des travaux nécessaires, tels que:
 - . dragage des sols meubles,
 - . déroctage et évacuation des matériaux des seuils rocheux et
 - . construction d'ouvrages de correction (épis, digues, panneaux de surface et de fond, etc.)
- compte tenu
- . des matériaux du lit et
 - . de la possibilité d'employer, dans une large mesure, des travailleurs des Etats-membres et d'utiliser des matériaux de construction locaux.

- Etude des gisements de matériaux de construction appropriés à proximité du lieu de mise en oeuvre ainsi que des possibilités et des coûts d'extraction et de transport.
- Détermination de l'emplacement adéquat des dépôts garantissant de faibles distances de transport pour les travaux ultérieurs.
- Etude des travaux à effectuer pour différents mouillages ainsi que des volumes et des coûts y afférents pour:
 - . les dragages,
 - . le dérochement et
 - . les ouvrages.
- Détermination des principaux critères de choix des engins de dragage.
- Elaboration d'une proposition pour le projet d'exécution.

3. Exposé général pour l'aménagement d'un fleuve

3.1 Le lit naturel d'un fleuve

3.1.1 Généralités

Tout fleuve tend à réaliser, au moins temporairement, un équilibre dans chacune de ses sections entre:

- le débit,
- la pente,
- la résistance à l'usure de son lit et
- les incidences des travaux d'aménagement.

La formation du lit est donc déterminée par les facteurs précités ainsi que par leur comportement réciproque et elle varie dans la mesure où le débit, la pente et le charriage subissent des modifications.

Sous l'action du courant et du charriage, les berges concaves s'éboulent et les courbes deviennent plus étroites. Le cours du fleuve devient ainsi plus long, ce qui entraîne une diminution de la pente du plan d'eau et de la vitesse d'écoulement. Il en résulte alors une diminution de la force tractrice et la formation d'alluvionnements ainsi que, éventuellement, d'îlots, de dédoublements du fleuve ou de ramifications.

Si l'un des facteurs susmentionnés est modifié, l'équilibre établi dans le fleuve se trouve à nouveau rompu. Un aménagement méthodique du fleuve est aussi nécessaire pour éviter des approfondissements de son lit, des éboulements de berge, des relèvements de fond, etc.

3.1.2 Méandres du fleuve

Les méandres caractérisent les fleuves coulant dans des plaines alluviales tels que le fleuve Sénégal. Les facteurs provoquant la formation de méandres sont clairement mis en évidence dans un secteur de fleuve présentant des courbes. En raison de l'effet d'inertie, les filets d'eau se concentrent dans une courbe vers A (voir figure 3.1.2 a)). Il en résulte une augmentation de la vitesse près de la berge concave et donc de la force tractrice. Etant donné que la berge est de plus attaquée de biais par le courant, les deux effets ont pour conséquence une attaque renforcée de la berge non protégée, qui entraîne finalement un éboulement de celle-ci.

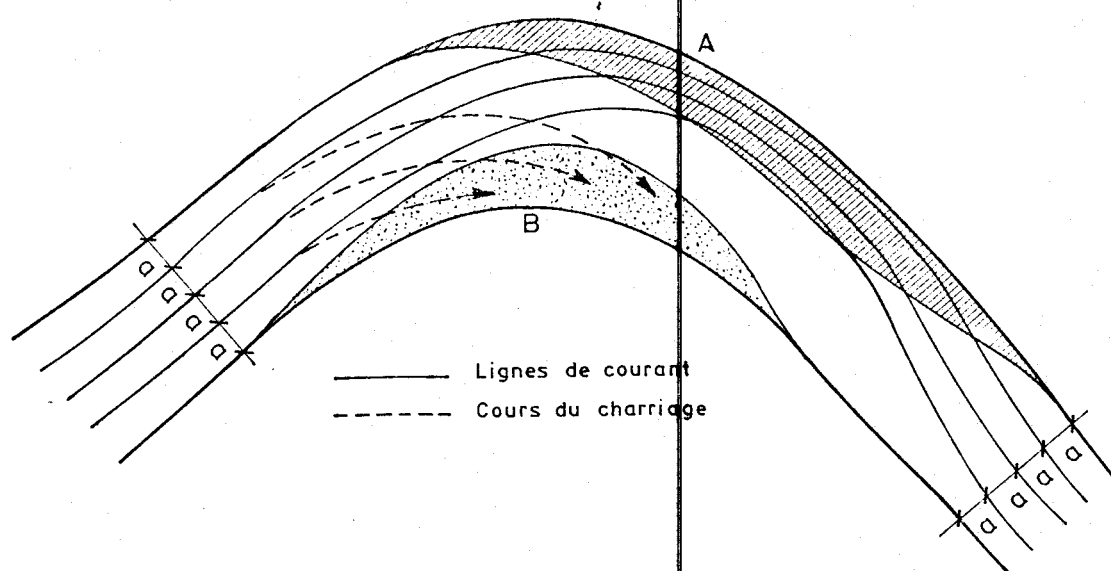


Figure 3.1.2 a): Evolution d'une courbe du fleuve

Le charriage en provenance des tronçons supérieurs du fleuve se déplace, lors de son passage dans la courbe du fleuve, sur des voies d'un rayon plus faible que celui

des voies des particules d'eau. Une partie des matériaux est dirigée sous forme de courant spiroïdal contre la berge convexe et forme un alluvionnement à B.

Cette déviation est due à une répartition dissymétrique de la vitesse dans un profil vertical et donc aux différentes intensités de la force centrifuge en fonction de la profondeur. La force $W = \gamma_w \cdot \Delta h \cdot f$ - conditionnée par la pente transversale du plan d'eau dans la courbe (voir figure 3.1.2 b) - domine dans le secteur inférieur du profil et provoque ainsi un courant transversal qui est dirigé, à la partie supérieure, vers la berge concave et, sur le fond, vers la berge convexe.

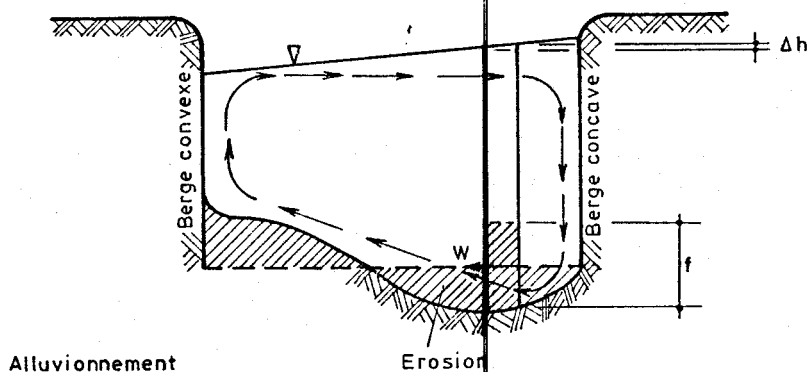


Figure 3.1.2 b): Affouillement dans les courbes du fleuve

L'alluvionnement de la berge convexe réduit la section mouillée, alors que la vitesse près de la berge concave et l'attaque de cette berge continuent à augmenter. Ces effets ont pour conséquence une réduction progressive du rayon des courbes et un déplacement longitudinal du méandre. La figure 3.1.2 c) montre la transformation de la section au cours des différentes phases.

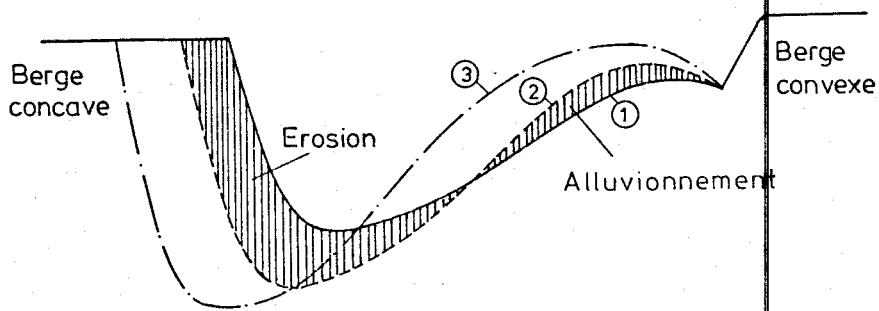


Figure 3.1.2 c) : Evolution d'un profil en travers dans une courbe du fleuve

Une comparaison des formes des sections le long d'un fleuve alluvial naturel est donnée à la figure 3.1.2 d).

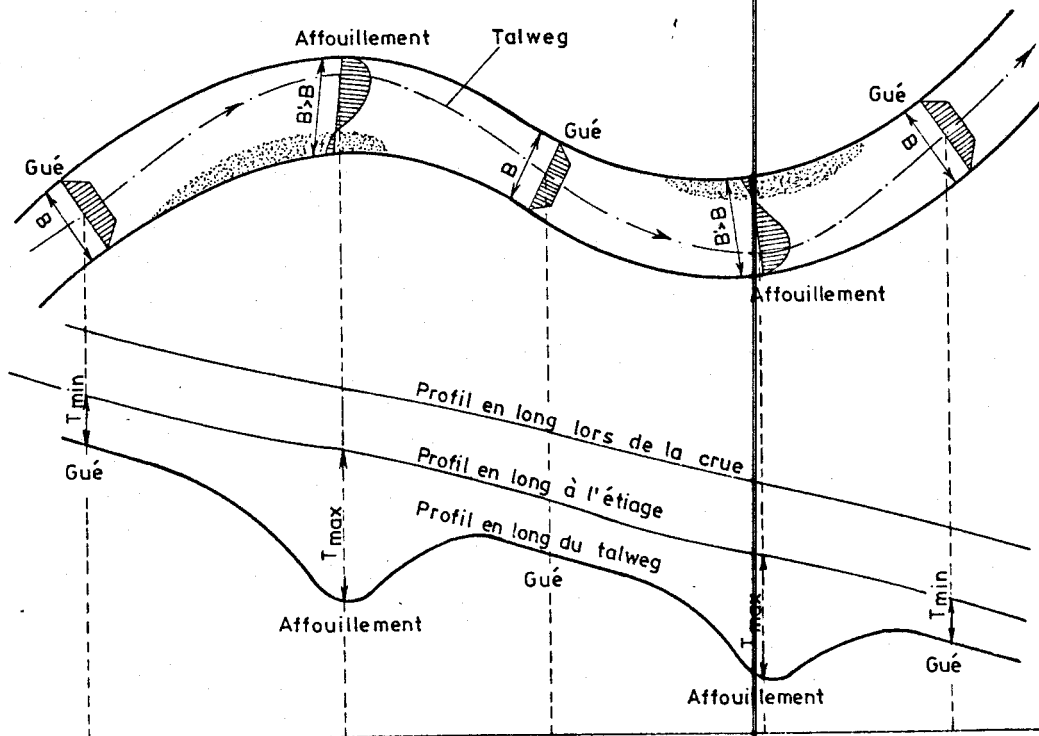


Figure 3.1.2 d) : Plan et profil en long caractéristique d'un fleuve alluvial naturel

Les boucles du fleuve présentent en plan une variation continue de leurs rayons de courbure. Le rayon des courbes est le plus faible dans le secteur d'affouillement, augmente peu à peu et atteint une valeur infinie au point d'inflexion, le gué. Le lit du fleuve est ainsi une succession de courbes avec des transitions douces allant du profil de gué symétrique au point d'inflexion des courbes jusqu'au profil d'affouillement, le profil en travers présentant la plus grande asymétrie.

Le talweg présente des méandres avec des courbes un peu plus accentuées que celles de l'axe du lit du fleuve.

Le profil en long du talweg a également un tracé onduleux. Le profil en long de la ligne d'eau au débit faible a, au gué, la plus grande pente car la section d'écoulement y est la plus faible. La pente est la plus faible à l'affouillement, où la section mouillée est la plus grande. Les différences de pentes s'atténuent pour un débit plus élevé et une pente homogène de la ligne d'eau s'établit finalement lors des hautes eaux, même sur de plus longs tronçons du fleuve.

Des modifications de la pente de la ligne d'eau modifient également la force tractrice. En période de basses eaux, un abaissement du fond se produit au gué, en raison de la plus grande pente existant en ce lieu. Les matériaux détachés se déposent dans l'affouillement. Lors des hautes eaux, une plus grande force tractrice se développe à l'affouillement. Celle-ci entraîne une érosion dans le profil de l'affouillement et un alluvionnement du profil du gué. Etant donné que la montée et la descente des eaux alternent, le profil en long du talweg varie constamment autour d'une position moyenne.

Une régularité dans la formation d'ensemble du cours naturel d'un fleuve est donc évidente. Toutefois, en raison des nombreux paramètres constamment changeants, ces régularités n'ont, jusqu'à présent, pas pu être exprimées quantitativement et d'une façon générale pour un fleuve naturel.

3.1.3 Méandres du talweg

En plus des modifications du lit mineur décrites ci-dessus, on observe - notamment dans les tronçons rectilignes - un déplacement du méandre du talweg par rapport au méandre du fleuve, (voir figure 3.1.3 a)). Ceci se traduit par l'apparition de bancs de sable mobiles.

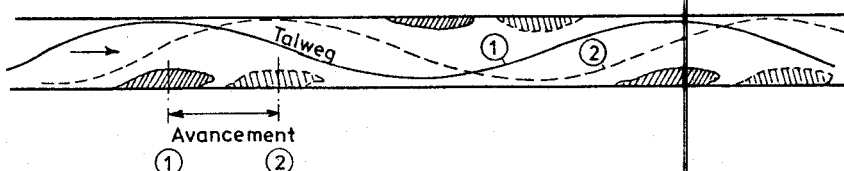


Figure 3.1.3 a) : Déplacement de bancs de sable dans des tronçons rectilignes du fleuve

L'espacement des bancs de sable est à peu près constant dans ce cas, alors que leur avancement pendant une certaine période dépend de l'importance du débit.

Le déplacement des bancs de sable entraîne une transformation permanente du profil en travers du lit mineur. L'enveloppe des différentes formes de profils correspond à peu près au niveau du fond de l'affouillement, (voir figure 3.1.3 b)). Ceci est très important pour la protection

des berges. En effet, si une protection de berge doit résister à un éboulement, elle doit - dans le cas de bancs de sable mouvants - être fondée au-dessous du fond d'affouillement, ou bien la fondation du pied doit être réalisée de sorte que la protection des berges reste également stable lors de l'affouillement.

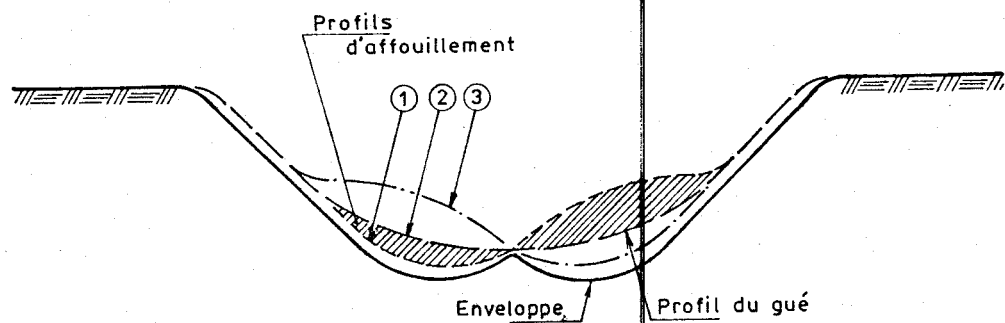


Figure 3.1.3 b): Transformation d'un profil en travers dans le cas de bancs de sable mouvants

3.2

Aménagement du lit d'un fleuve

L'aménagement du tracé naturel d'un fleuve a pour but la réalisation d'un lit normal et stable.

Conformément au but de l'aménagement, une distinction est faite entre:

- l'aménagement du lit mineur,
- l'aménagement du lit au débit en basses eaux et
- l'aménagement du lit majeur.

3.2.1 Aménagement du lit mineur

L'aménagement du lit mineur sert en premier lieu à la navigation et il a pour but:

- de créer un lit de fleuve homogène,
- de supprimer des dédoublements de fleuve,
- d'éviter la formation de bancs de sable,
- de supprimer des courbes très prononcées et
- de créer une pente plus équilibrée de la ligne d'eau.

3.2.2 Aménagement du lit au débit en basses eaux

L'aménagement du lit au débit en basses eaux sert aussi, avant tout, à la navigation. Dans ce cas, un chenal de navigation présentant la largeur et la profondeur nécessaires et les rayons de courbure admis est réalisé dans le lit mineur. L'aménagement précité du lit mineur est en général la condition nécessaire pour un aménagement du lit pour la navigation.

Dans le cadre de l'aménagement du lit au débit en basses eaux, seuls les travaux suivants seront effectués:

- suppression des passages ayant une profondeur insuffisante,
- élargissement des tronçons étroits et profonds par réduction de la profondeur,
- agrandissement des rayons de courbure, conformément aux besoins de la navigation et, éventuellement,
- réduction des pentes trop fortes, de façon à obtenir une vitesse d'écoulement acceptable pour la navigation.

Dans le cas d'un régime d'eau irrégulier, la régularisation du débit est la condition la plus importante pour un aménagement réussi et rentable du lit au débit en basses eaux.

3.2.3 Aménagement du lit majeur

Les aménagements du lit majeur ont pour but de réduire ou de supprimer les dangers pouvant survenir à une vallée et à ses habitants lors des crues. A cet effet, les travaux suivants devront être effectués:

- construction des bassins de retenue pour réduire les pointes de crues,
- réalisation d'un lit majeur suffisamment large, éventuellement limité par des digues.

3.2.4 Réalisation et incidences de l'aménagement d'un fleuve

Tout aménagement d'un fleuve représente une atteinte aux conditions naturelles. Les modifications du lit du fleuve devront donc être prévues de façon à modifier le moins possible le tracé naturel et la pente du fleuve. Les incidences des travaux d'aménagement ne se manifestent souvent qu'après des années et ne peuvent être alors que difficilement enrayées. Dans le cas de travaux d'aménagement mal conçus, les travaux d'entretien pourront devenir rapidement incontrôlables et nécessiter des investissements supplémentaires.

Le principe selon lequel le fleuve doit réaliser lui-même le lit demandé, alors que les ouvrages ont uniquement pour but de l'aider à former son lit, est appliqué pour tous les travaux d'aménagement fluvial. Par les ouvrages de correction et de dragage du chenal navigable, la force tractrice du courant doit être dirigée prudemment dans le sens désiré.

Ceci nécessite que les travaux pour l'aménagement du chenal navigable sont effectués de l'embouchure à la source, afin que l'évacuation nécessaire soit constante et que les matériaux entraînés par le fleuve ne se déposent pas à des endroits inappropriés.

En raison des différentes caractéristiques des fleuves et du grand nombre de paramètres, des règles quantitatives valables universellement pour l'aménagement n'ont pas pu jusqu'à présent être mises au point. Seules des données qualitatives peuvent donc être prises en considération lors de l'élaboration des projets, à savoir:

- (1) La stabilité d'un lit de fleuve nécessite un tracé sinueux avec une alternance régulière de courbes concaves et convexes ayant des transitions suffisantes, (voir figure 3.2.4 a)).

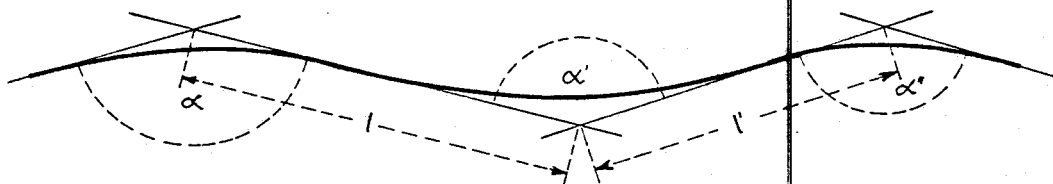


Figure 3.2.4 a) Réseau de tangentes d'un fleuve

- (2) Afin que les profondeurs d'eau soient suffisantes dans les passages, les tangentes et les angles ne doivent être ni trop grands ni trop petits.
- (3) Pour une formation régulière du lit, les courbes ne devraient pas avoir un rayon constant. Dans le cas idéal, le rayon devrait avoir une valeur infinie au point d'inflexion et diminuer régulièrement à partir

de ce point jusqu'au milieu de la courbe où il atteint sa valeur minimale, (voir figure 3.2.4 b)). De plus, les largeurs du fleuve doivent augmenter à partir du point d'inflexion jusqu'au sommet de la courbe. Les points d'inflexion des lignes des rives ne doivent, si possible, pas être situés dans le même profil en travers.

Etant donné que l'exactitude de l'implantation et de la réalisation d'un chenal navigable dans le cours naturel d'un fleuve est limitée, on utilise souvent des courbes en anse de panier ou des arcs de cercle avec des courbes de transition sous forme de clothoïdes. Pour des raisons d'exécution, on utilise souvent - comme par exemple pour le Rhin - uniquement des arcs de cercle, sans que ceci ait des conséquences négatives.

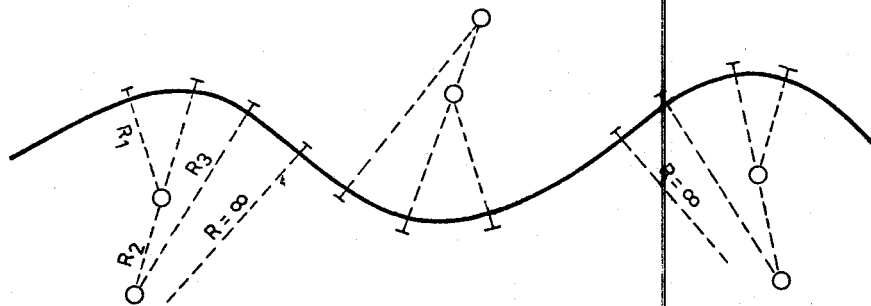


Figure 3.2.4 b): Tracé d'une courbure

Etant donné que, théoriquement, il n'existe aucune solution pour l'aménagement d'un fleuve, cet aménagement ne pourra avoir lieu que sur la base des expériences générales et de l'observation des règles précitées. Il serait donc opportun d'aménager tout d'abord des tronçons d'essai et d'étudier les incidences de l'aménagement. De tels tronçons d'essai ne peuvent cependant, le plus souvent, pas être réalisés pour des raisons financières et par faute de temps. Les modèles hydrauliques peuvent par-

tiellement remplacer de tels essais et, dans ce cas, les conditions naturelles des tronçons de fleuve sélectionnés sont reproduites à échelle réduite et étudiées pendant une durée raccourcie.

Dans le cadre de la Mission A.1.6, quelques endroits caractéristiques du fleuve Sénégal seront examinés dans un modèle hydraulique, afin de pouvoir définir, de façon aussi exacte que possible, des travaux d'aménagement rentables et adéquats.

Malgré tous les essais et estimations préalables relatifs à l'incidence des travaux sur le régime du fleuve, tous les projets d'aménagement devront avoir un caractère flexible. Le lit du fleuve devra - pendant et après l'exécution des travaux - être constamment observé, afin de pouvoir évaluer l'efficacité des travaux. Les travaux d'entretien doivent tenir compte du comportement du fleuve et compléter les travaux déjà réalisés ou les corriger éventuellement dans une certaine mesure. L'état d'aménagement définitif ne pourra donc être obtenu qu'après plusieurs années, grâce à des travaux d'entretien et à la construction d'autres ouvrages de correction.

3.3

Méthodes d'aménagement du fleuve

L'aménagement pour la navigation - c'est-à-dire la réalisation d'un chenal navigable assez large et profond dans le cours naturel d'un fleuve - peut être effectué selon les deux méthodes suivantes:

- (1) La construction d'ouvrages tels que épis, digues, épis de fond, etc. qui devront être conçus de sorte que le fleuve puisse, à la longue, aménager lui-même le chenal navigable.

- (2) La réalisation du chenal navigable par dragages et dérochements et le maintien de celui-ci par des travaux d'entretien.

Les deux méthodes devront s'efforcer de ne pas trop détruire l'équilibre du fleuve, afin de réduire le plus possible les travaux d'entretien.

La construction d'ouvrages est la méthode classique. Les résultats escomptés ne peuvent être obtenus dans ce cas que si les modifications du lit du fleuve, notamment lors d'interventions externes, font l'objet d'observations assez longues. Les travaux seront effectués progressivement et s'étendront donc sur des années et des décennies. Cette méthode nécessite, d'autre part, des coûts d'investissement considérables pour les ouvrages.

En cas d'absence d'expériences suffisamment longues au sujet des modifications du lit d'un fleuve - comme par exemple dans le cas du fleuve Sénégal - le chenal navigable est de nos jours réalisé par dragages et dérochements et il est maintenu praticable par des dragages d'entretien annuels. Dans ce cas, il sera renoncé partiellement ou totalement à des ouvrages d'aménagement.

Ce procédé est possible étant donné que des dragues efficaces ont été mises au point au cours des dernières décennies et que les coûts des dragages ont pu être ainsi considérablement réduits. Un autre avantage de cette méthode réside dans le fait que le chenal navigable peut être aménagé et utilisé en peu de temps.

En raison des conditions existantes, la réalisation d'un chenal navigable par dragages et dérochements est recommandée pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la na-

vigation. Des ouvrages de correction pourront être réalisés aux endroits où des dragages ne peuvent pas garantir des résultats satisfaisants.

Même après la réalisation d'un chenal navigable, le caractère d'un fleuve naturel est maintenu avec tous ses avantages et inconvénients. Par conséquent, des travaux devront être exécutés pour l'entretien et l'amélioration du chenal navigable et des ouvrages supplémentaires devront être construits. Les tâches essentielles de la future Direction de la Voie Navigable comprendront:

- l'exécution des dragages d'entretien annuels immédiatement après la crue et
- la construction d'ouvrages supplémentaires.

3.4 Canalisation d'un fleuve

Les méthodes décrites à l'art. 3.3 pour l'aménagement d'un fleuve sont basées sur l'existence d'un débit en basses eaux suffisant pour la navigation. Celui-ci sera obtenu, pour le fleuve Sénégal, par la régularisation des débits par le barrage de Manantali.

Dans la mesure où les débits en basses eaux ne suffisent pas pour la navigation, le mouillage requis ne pourra être garanti que par la canalisation du fleuve.

Lors de la canalisation, la construction de barrages le long du fleuve transformera la pente naturelle de la ligne d'eau en une pente en gradins. Des écluses devront être prévues pour permettre aux bateaux de franchir les différences de niveau des barrages. Les barrages seront souvent liés à des usines hydroélectriques si des chutes et des débits suffisants sont disponibles assez longtemps.

La canalisation d'un fleuve présente, par rapport à l'aménagement du lit au débit en basses eaux, les principaux désavantages suivants:

- coûts d'investissement nettement plus élevés,
- plus longues durées de rotation des bateaux en raison des temps d'éclusage.

Ses avantages seraient:

- meilleure utilisation des débits,
- faibles vitesses du courant et
- production éventuelle d'énergie.

Une canalisation ne sera pas retenue pour le fleuve Sénégal car, d'une part, elle entraînerait des coûts d'investissement trop élevés et, d'autre part, le débit nécessaire à la navigation peut être mis à disposition par le barrage de Manantali.

4. Travaux d'aménagement et ouvrages

4.1 Travaux de dragage

Les seuils qui gênent le trafic sur le fleuve seront supprimés par dragages. Ces travaux entraînent des modifications de l'écoulement et ont généralement pour conséquence un abaissement du niveau d'eau et donc une diminution du mouillage en amont du seuil. L'ordre de grandeur de l'abaissement est déterminé dans le cas présent par le modèle mathématique.

L'efficacité du dragage du sable et du silt sera d'une durée relativement faible et des dragages d'entretien annuels seront donc nécessaires. L'ampleur des dragages d'entretien peut cependant être réduite par la construction d'ouvrages supplémentaires qui tiennent compte des expériences acquises au cours des années.

Une inclinaison des talus de 1:5 est admise pour tous les travaux de dragage, en raison du sol partiellement très silteux et du courant.

4.2 Travaux de dérochement

Les travaux de dérochement permettent l'aménagement d'un chenal stable dans le lit naturel du fleuve. Des travaux d'entretien ne seront alors nécessaires que si des charriages se déposent dans le chenal ou si les conditions d'évacuation en aval du secteur rocheux subissent des modifications. Des travaux supplémentaires tels que des approfondissements ou des élargissements du chenal navigable ne pourront cependant plus être effectués dans les secteurs rocheux avec du matériel simple.

Dans le cas de roches stables, les talus présenteront une inclinaison d'env. 1:1.

4.3 Ouvrages

Les ouvrages hydrauliques comprennent tous les ouvrages servant à resserrer ou à fixer le chenal navigable ainsi qu'à protéger les talus et le fond, à savoir:

- épis
- digues
- panneaux de surface
- épis de fond
- panneaux de fond.

4.3.1 Epis

4.3.1.1 But et effet

Les épis sont les ouvrages les plus employés pour l'aménagement d'un fleuve. Ils sont le plus souvent regroupés et construits à partir de la rive existante jusqu'à la ligne d'eau projetée et ils rétrécissent ainsi la largeur du lit au débit en basses eaux, (voir figure 4.3.1.1).

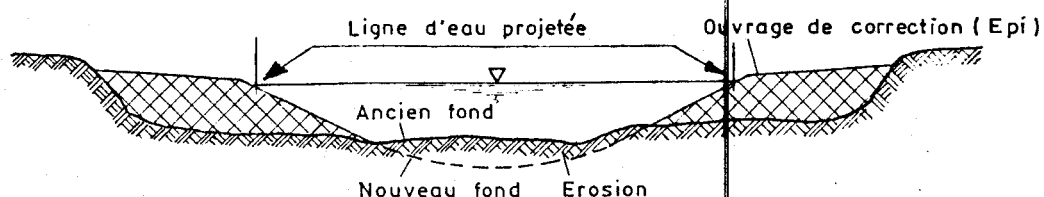


Figure 4.3.1.1: Effet des épis

L'effet d'un épi réside dans le fait que les filets d'eau sont déviés à la tête de l'épi selon un angle d'environ 6° vers l'espace compris entre deux épis. Un tourbillon à axe vertical se forme ainsi dans cet espace qui entraîne avec le temps un alluvionnement entre les épis et la rive. Pour des hauteurs d'eau plus élevées par lesquelles les épis sont inondés, un deuxième tourbillon se forme avec un axe horizontal. En raison de ces tourbillons, la vitesse du courant est plus faible entre deux épis d'une même rive qu'entre les têtes de deux épis opposés.

La réduction de la largeur du lit du fleuve entraîne une augmentation de la vitesse d'écoulement. Cette augmentation est cependant partiellement compensée par les ralentissements dus à la présence des espaces compris entre les épis. Afin de garantir en permanence l'effet des épis, les travaux qui sont parfois réalisés à tort pour obtenir un alluvionnement complet de l'espace compris entre les épis ne doivent pas être effectués.

4.3.1.2 Disposition des épis

a) Orientation des épis (voir figure 4.3.1.2 a))

Pour l'orientation des épis par rapport au courant, une distinction est faite entre des épis:

- inclinants
- déclinants et
- normaux ou rectangulaires.

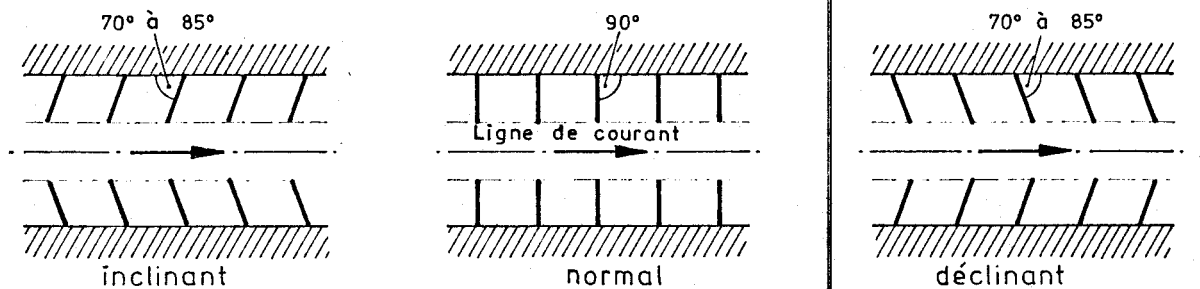


Figure 4.3.1.2 a): Orientation des épis

Les épis inclinants sont placés en direction amont. L'angle formé par l'axe de l'épi et la rive en amont varie de 70° à 85° . Le courant est ainsi détourné de la rive et repoussé vers la partie centrale du fleuve. L'enracinement de l'épi et la berge sont ainsi soumis à de plus faibles attaques. La tête d'épi doit être de construction solide car elle est menacée par l'affouillement. (voir figure 4.3.1.2 b)).

Les épis déclinants sont placés en direction aval. L'angle formé par l'axe de l'épi et la rive en aval varie entre 70° et 85° . Cette disposition détourne le courant de la partie centrale du fleuve qui attaque alors la berge et la racine des épis. Dans ce cas, des travaux supplémentaires devront être effectués pour protéger les berges. (voir figure 4.3.1.2 b)).

Les épis normaux sont placés rectangulairement à la rive. Leur effet est intermédiaire entre celui des épis inclinants et déclinants.

Des épis normaux ou inclinants conviennent pour le fleuve Sénégal et ceux-ci sont de nos jours exclusivement utilisés pour les fleuves européens. D'une façon générale, la préférence est donnée aux épis normaux, en raison de leur simplicité de réalisation et d'implantation.

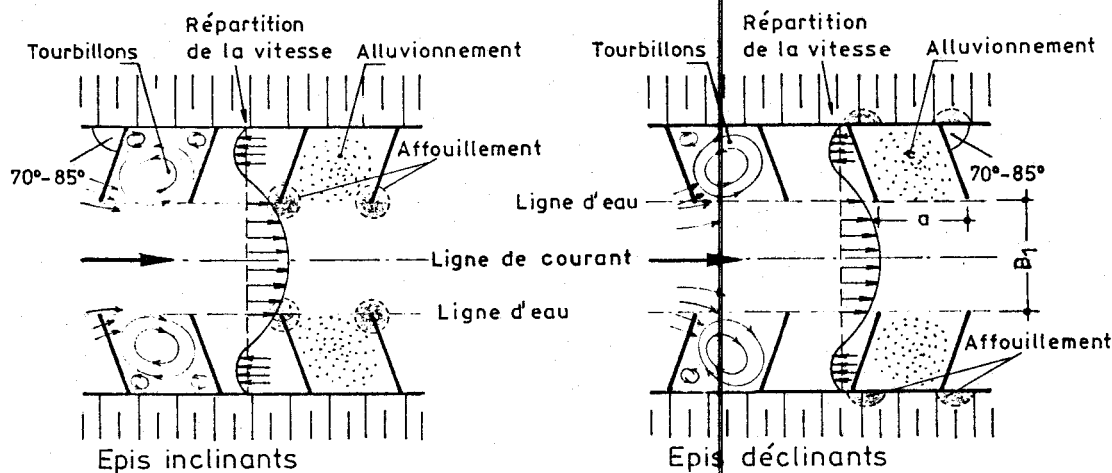


Figure 4.3.1.2 b) : Direction et effet des épis

b) Position des épis

Les épis doivent être placés de sorte que leurs axes se croisent dans l'axe du chenal navigable afin d'empêcher une oscillation du courant. Cette règle est également valable pour de fortes courbes. L'orientation de l'épi est déterminée à l'aide des tangentes du cercle avec $r = R \cdot \cos \alpha$, où R est le rayon de la courbe et α l'angle d'inclinaison de l'épi par rapport au courant. (Voir figure 4.3.1.2 c)).

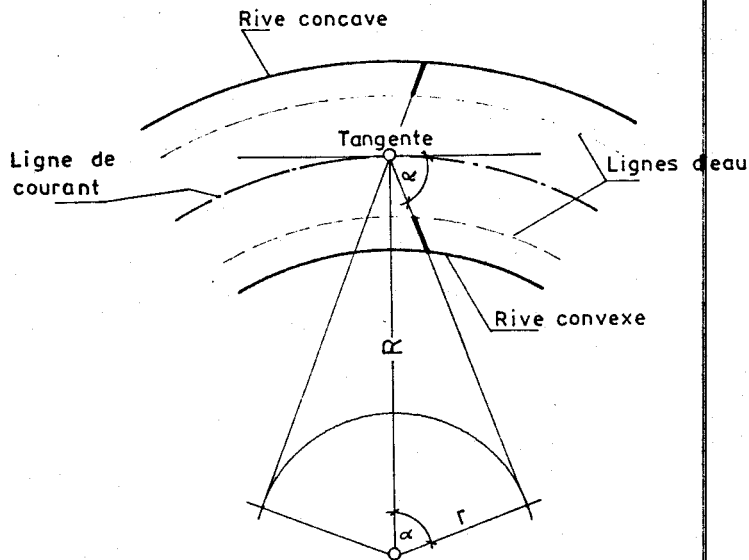


Figure 4.3.1.2 c): Disposition des épis dans les courbes

c) Distances entre les épis

La distance a entre les épis dépend de:

- la largeur à aménager B_1
- la longueur de l'épi l et du
- but de l'épi.

Dans la mesure où la section d'écoulement doit être réduite par des épis, les conditions suivantes doivent être retenues:

- (1) $a \leq B_1$ ou
- (2) $a = 1,0 \text{ à } 2,4 l$.

Une solution efficace et, par là-même, économique est trouvée lorsque, lors de l'application de la 2e condition

$$a = 1,5 l.$$

Si l'épi doit protéger en premier lieu la berge, il faut appliquer:

$$(3) a \leq 4,75 l.$$

Cette dernière condition résulte de l'exigence selon laquelle le courant diffracté à la tête de l'épi avec un angle d'environ 6° doit atteindre le prochain épi à peu près en son centre.

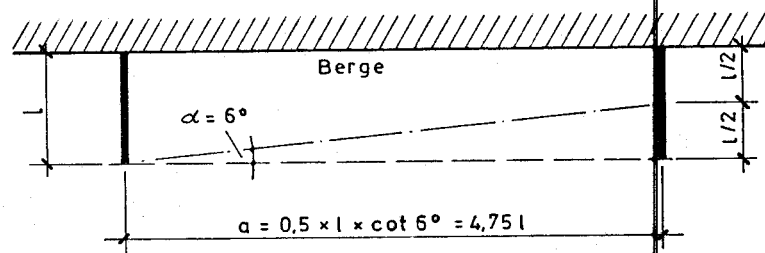


Figure 4.3.1.2 d): Diffraction du courant pour des épis

Pour de fortes courbes, la distance entre les épis devra être réduite en raison des fortes attaques de la rive concave.

4.3.1.3 Construction

Dans le sens longitudinal, l'épi comprend trois parties, à savoir:

- l'enracinement,
- la partie médiane et
- la tête.

L'enracinement de l'épi devra être relié à la berge afin d'éviter, lors de l'inondation de l'épi, des affouillements et des creusements, (voir figure 4.3.1.3). Si le courant attaque fortement la berge, celle-ci devra, dans le secteur de l'épi, être également protégée par un panneau de surface.

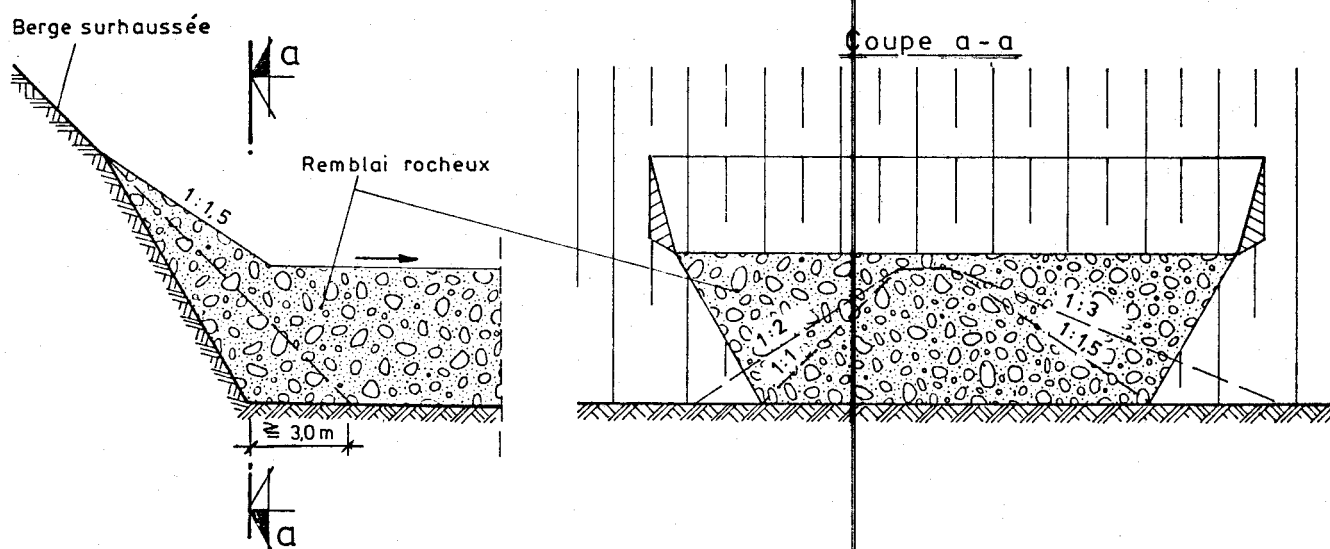


Figure 4.3.1.3: Rattachement de la racine de l'épis à la berge

La crête de l'épi descend à partir de la berge avec une pente de 1:50 à 1:200. L'inclinaison des talus de la tête de l'épi sera de 1:3 à 1:5. Une faible inclinaison a pour avantage de détourner le courant de la tête de l'épi et de réduire l'attaque de celle-ci ainsi que les frais d'entretien. En outre, dans ce cas moins de tourbillons se forment dans le chenal navigable.

Il a été choisi pour le fleuve Sénégal:

- une inclinaison de la crête de l'épi: 1:200
- une inclinaison de la tête: 1:4.

Les inclinaisons de talus suivantes conviennent afin d'obtenir une stabilité suffisante:

- en amont: 1:2
- en aval: 1:3.

L'enracinement peut avoir une inclinaison plus forte, par exemple de 1:1,0 à 1:1,5.

La cote de la crête de l'épi dépend du débit de référence et elle devrait être située 0,30 à 0,50 m au-dessus de la ligne d'eau.

La crête devrait avoir une largeur de 1,50 m à 2,00 m.

La construction de l'épi le plus en amont d'un groupe d'épis devra être plus résistante que celle des autres, en raison de l'attaque plus forte du courant.

4.3.1.4 Matériaux de construction

Selon les matériaux de construction utilisés, une distinction est faite entre les épis en:

- empierrement,
- empierrement avec des noyaux en gravier ou en sable (construction mixte),
- gabions,
- sacs ou tuyaux en matière plastique remplis de sable,
- treillis métalliques ou en clayonnages.

a) Épis en empierrement

Les pierres sont le matériau de construction le plus employé pour les épis. Selon les matériaux à disposition, les épis peuvent être construits uniquement en pierres ou avec des noyaux en gravier ou en sable.

Les épis en empierrement résistent particulièrement bien aux endommagements dus au courant et aux avaries. Ils sont cependant plus chers que ceux réalisés avec des noyaux en sable, notamment lorsque les pierres appropriées ne se trouvent pas à proximité.

Vu les vitesses de courant relativement faibles du fleuve Sénégal de 1,4 m/s au maximum lors de la crue, des pierres d'un poids de 0,2 à 0,4 kN (20 à 40 kg) seront suffisantes.

Pour des épis en empierrement avec un noyau en gravier ou en sable, une petite digue d'appui en pierres sera tout d'abord réalisée du côté aval. Le noyau sera ensuite construit et finalement le recouvrement du noyau et la crête. Une nappe filtrante non-tissée est placée entre le noyau en gravier ou en sable et l'empierrement pour éviter un affouillement des matériaux.

La tête de l'épi est particulièrement menacée par le courant et l'affouillement. Elle doit donc être réalisée en empierrement, même dans le cas d'épis avec des noyaux en sable ou en gravier. La base de la tête de l'épi doit être protégée par un panneau en pierres. Dans le cas d'un fond sableux, une nappe filtrante non-tissée devrait être placée sous la tête de l'épi.

Des matelas de fascines en branchages et pierres ne pourront pas être utilisés en tant que panneaux car des quantités suffisantes de bois approprié n'existent pas le long du fleuve.

Dans la mesure où les épis seront construits avant la mise en service du barrage de Manantali, les travaux pourront être réalisés à sec. Le noyau en sable ou en gravier sera tout d'abord réalisé sans la digue d'appui. Ce mode de construction permettra de réduire l'emploi de pierres et, par là-même, les coûts. Dans ce cas, le noyau en sable pourra être protégé par une nappe filtrante non-tissée et par des pierres en béton au lieu des pierres naturelles.

b) Epis en gabions

Si des pierres du poids requis n'existent pas en quantité suffisante, le recours aux gabions remplis de pierres plus petites est alors recommandé. La largeur des mailles de ces gabions dépend des dimensions des grains du matériau à disposition.

Les gabions sont placés à joints contrariés. Une couche filtrante ou une nappe filtrante n'est généralement pas nécessaire entre les gabions et le fond, car les gabions remplis de matériaux plus fins ne s'enforcent pas dans le fond. Un recouvrement des gabions avec des pierres est recommandé aux endroits exposés à un fort courant et à une forte usure par le sable, tels que par exemple à la tête des épis.

c) Epis en sacs ou tuyaux en matière plastique remplis de sable

Des sables fins peuvent être utilisés pour la construction des épis s'ils sont mis dans des sacs ou des tuyaux en matière plastique. Les sacs sont en tissu de fils plats noirs de polyéthylène qui résistent bien aux rayons ultra-violet.

En raison de la surface très lisse des tissus, des mesures devront être prises pour parer au glissement des sacs de sable. Avant d'empiler les sacs, un approfondissement plat devra être réalisé dans le fond, de sorte que les sacs reposent l'un contre l'autre.

Dans le cas d'une utilisation de tuyaux en matière plastique, ceux-ci seront placés entre des pieux foncés par battage et remplis de sable.

Les sacs et tuyaux en matière plastique, facilement à endommager, devront être protégés par des pierres. Notamment dans le cas de voies navigables, le danger d'endommagement est très élevé en raison de la circulation de bateaux. L'utilisation rentable de ce matériau est donc remise en question.

Des couches filtrantes ou des nappes filtrantes ne sont nécessaires que pour l'empierrement à la tête de l'épi.

d) Epis en treillis métalliques et clayonnage

De petits épis ayant des fonctions secondaires peuvent être rapidement réalisés au moyen de treillis métalliques tendus entre des pieux.

La résistance au courant du treillis entraîne une retenue des eaux et un alluvionnement devant l'épi.

Les matériaux flottants retenus par le treillis métallique augmentent certes la résistance au courant, mais représentent cependant une charge considérable pour le treillis et les pieux.

Pour les bas épis, des clayonnages constitués de branchages peuvent remplacer les treillis métalliques.

4.3.1.5 Avantages et inconvénients des épis

Par rapport aux digues, les épis présentent les avantages et inconvénients suivants:

Avantages:

- Des investissements initiaux plus faibles, car seul un épi sur deux ou même sur trois devra être éventuellement construit dans les premiers temps.
- Entretien peu coûteux.
- Bonne adaptation des épis en empierrement lors des corrections ultérieures.

Au cours des travaux d'entretien, la hauteur et la longueur des épis peuvent être modifiées et les épis peuvent ainsi obtenir progressivement les dimensions et formes correspondant à un cours de fleuve stable. Ceci est très important car la largeur de correction exacte ne peut être généralement déterminée qu'à la suite d'observations effectuées pendant plusieurs années. Les matériaux de construction peuvent être alors réutilisés.

Inconvénients:

Comme inconvénient, il convient de mentionner le guidage incertain des filets d'eau dans le cas de fortes courbes et de plus grandes vitesses d'écoulement.

4.3.1.6 Réalisation des travaux et entretien

A la différence des autres travaux d'aménagement, la construction d'un groupe d'épis doit toujours commencée par l'épi supérieur. Il convient souvent de relier cet épi à un panneau de surface. Les autres épis ne sont alors que partiellement attaqués par le courant et peuvent, dans le cas d'un alluvionnement, être de plus petites dimensions.

Afin de constater à temps des affouillements à la tête de l'épi et de prendre des mesures appropriées, les modifications de profondeur dans le secteur de la tête d'épi devront être mesurées après chaque crue.

4.3.2 Digues4.3.2.1 But et effet

Les digues ont - de même que les épis - la fonction de réduire la largeur du fleuve afin d'obtenir un plus grand mouillage lors des basses eaux.

Les digues sont disposées parallèlement à la direction du courant, dans la ligne d'eau du débit de référence. Elles seront le plus souvent placées devant la rive concave des courbes d'un rayon faible, dans le cas où des épis gêneraient la navigation en raison d'un guidage turbulent ou où ils seraient trop courts. Le secteur du fleuve séparé par la digue est divisé, le cas échéant, par des ouvrages transversaux afin d'éviter un courant secondaire entre la digue et la berge et d'accélérer l'alluvionnement.

Des digues de séparation sont placées dans le secteur des bifurcations du fleuve ainsi qu'à l'embouchure des affluents en vue d'améliorer les conditions du courant.

La construction des digues permet d'obtenir plus rapidement et plus régulièrement les modifications désirées du lit du fleuve qu'en réalisant des épis. Le courant est régulier et calme dans le secteur des ouvrages parallèles.

4.3.2.2 Construction

La crête des digues est généralement située 30 à 50 cm au-dessus de la ligne d'eau du débit de référence.

Pour des raisons financières, la crête des digues du fleuve Sénégal ne devrait être tout d'abord située qu'à 30 cm au-dessus de la ligne du niveau d'eau de référence. Pour des hauteurs d'eau supérieures, l'eau se déverse par-dessus l'ouvrage, entraînant un alluvionnement derrière la digue. Le processus d'alluvionnement peut encore être accéléré par la réalisation d'ouvertures dans l'ouvrage. En cas de besoin, une surélévation pourra être réalisée ultérieurement, même si le nouvel ouvrage repose partiellement sur l'alluvionnement, (voir figure 4.3.2.2).

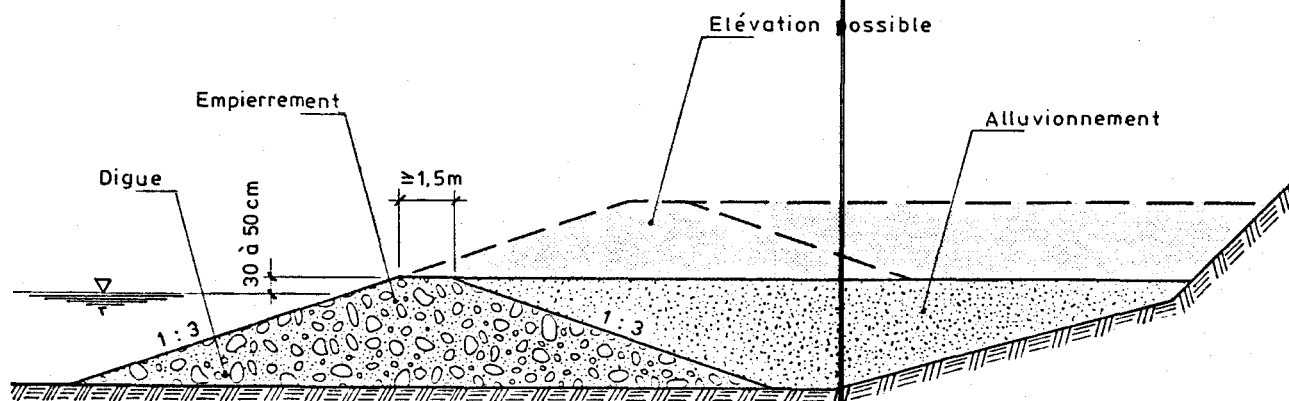


Fig. 4.3.2.2: Réalisation progressive d'une digue

Les talus des digues ont une inclinaison de 1:2 à 1:4. Pour le fleuve Sénégal, une inclinaison de 1:3 est prévue des deux côtés.

4.3.2.3 Matériaux de construction

Les matériaux de construction décrits à l'art. 4.3.1.4 sont également utilisables pour les digues.

4.3.2.4 Avantages et inconvénients des digues

Par rapport aux épis, les digues offrent les avantages suivants:

- Les modifications désirées du lit du fleuve sont plus rapidement obtenues.
- Le courant du fleuve est mieux guidé, des courants transversaux défavorables sont largement évités.

A ces avantages s'opposent les inconvénients suivants:

- Les investissements sont nettement plus élevés.
- La possibilité d'adaptation est limitée si des modifications deviennent nécessaires. Des transformations nécessitent souvent une nouvelle réalisation des ouvrages, avec ou sans démolition préalable des ouvrages existants.

Par suite des inconvénients précités, des digues ne devraient être construites dans le fleuve Sénégal qu'aux endroits où il est certain que des modifications ne surviendront pas et aux endroits où la construction d'épis ne convient pas pour des raisons techniques et financières.

4.3.3 Panneaux de surface

4.3.3.1 But et effet

Les panneaux de surface sont réalisés pour éviter l'af-fouillement des berges dans le cas de sol non rocheux et pour empêcher le déplacement des méandres du fleuve. Les rives concaves sont particulièrement menacées.

D'une façon générale, les rives protégées sont réalisées avec une inclinaison de talus de 1:3 qui représente un optimum en matière de construction et d'entretien.

4.3.3.2 Construction

Les panneaux de surface se composent de:

- la protection du pied de panneau,
- la protection dans le secteur des basses eaux et des eaux moyennes et
- la protection au-delà des eaux moyennes.

a) Protection du pied

La stabilité des panneaux de surface dépend essentiellement de la stabilité de la protection du pied qui doit donc être suffisamment enracinée dans le fond du fleuve. D'éventuels approfondissements du fond dus à l'érosion devront être pris en considération. D'une façon générale, la cote inférieure de la protection du pied devra donc être située à 1,5 m sous le fond du fleuve, (voir également l'art. 3.1.3).

Selon la stabilité du talus naturel, la fosse pour la protection du pied doit être réalisée avec l'inclinaison maximale de 1:1.

La digue de la protection du pied a une inclinaison de 1:1,5 du côté du fleuve et de 1:1 du côté rive. Elle doit être réalisée avec des pierres de 0,2 à 0,4 kN (20 à 40 kg). L'espace entre la digue de pied et le talus de rive doit être rempli de gravier. Le cas échéant, une nappe filtrante non-tissée peut être prévue. La figure 4.3.3.2 a) donne de plus amples renseignements à ce sujet.

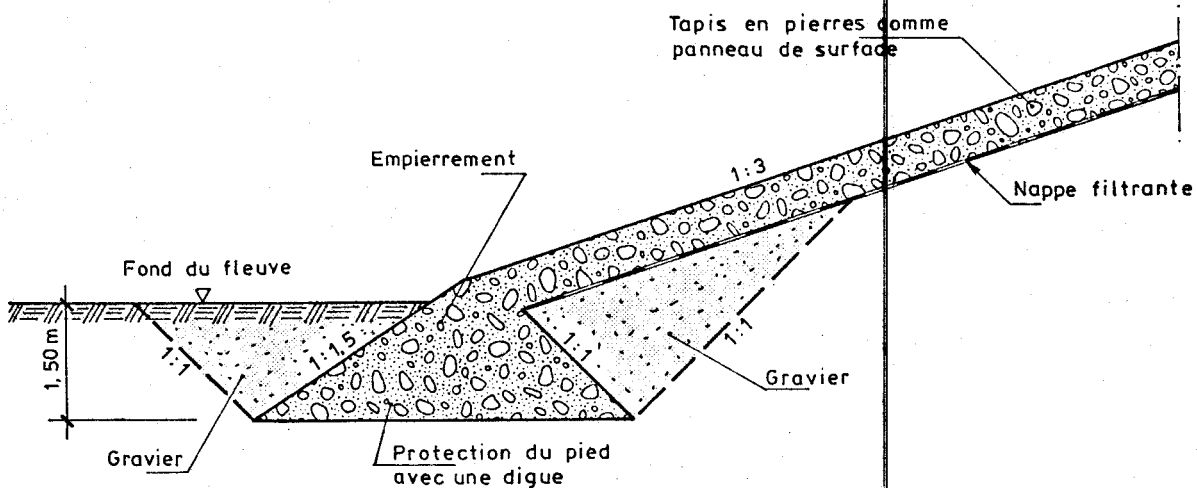


Figure 4.3.3.2 a): Conception des panneaux de surface avec digue de protection du pied

La protection du pied décrite ci-dessus est assez coûteuse en raison de la fouille à réaliser sous l'eau. Une variante sans déblaiement pourra donc être envisagée. Dans ce cas, un tapis en pierres de 0,5 à 1,5 m d'épaisseur et d'environ 3 à 5 m de largeur sera posé devant le panneau de surface, sur une nappe filtrante non-tissée ou sur une couche de gravier-filtre de 30 cm d'épaisseur. Lors d'affouillements devant la protection du pied, ce tapis s'abaissera sans pour autant menacer directement la stabilité du revêtement de rive. Ce mode de construction nécessite cependant

une surveillance plus régulière afin que des réfections puissent, le cas échéant, être effectuées à temps. La réalisation de ce mode de construction est meilleur marché, mais son entretien est plus cher que pour une protection de pied avec une digue de pierres surbaissée.

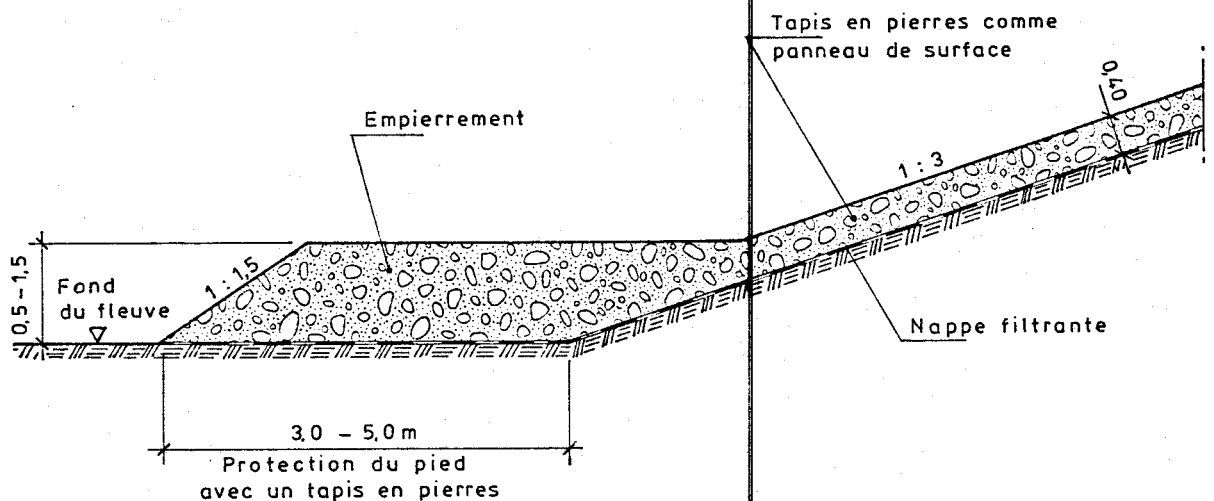


Fig. 4.3.3.2 b): Panneaux de surface avec tapis en pierres pour la fixation du pied

b) Protection de la berge entre le fond et le niveau des eaux moyennes

Ce secteur est particulièrement exposé aux vagues provenant du trafic fluvial. Une inclinaison de 1:3 est choisie, étant donné que celle-ci a fait ses preuves dans de tels cas. Le revêtement de rive s'élèvera de 0,5 à 1,0 m au-dessus du niveau de référence.

Dans la mesure où la berge est plus abrupte, son inclinaison est ramenée à 1:3 par un remblai en sable ou en gravier. La berge est alors recouverte d'une nappe filtrante ou d'une couche de gravier-filtre et elle est fixée par des pierres.

Si la réalisation peut avoir lieu à sec, c'est-à-dire avant la mise en service du barrage de Manantali ou au-dessus de la ligne d'eau du débit de référence, l'enrochement pourra être remplacé par un perré en pierres naturelles ou par une couverture en gabions métalliques remplis de ballast. Les perrés pourront être également remplacés par une couverture en pavés ou en dalles de béton avec languettes et rainures posés en appareil.

c) Protection de la berge au-dessus de la ligne des eaux moyennes

Au-dessus de la ligne des eaux moyennes, l'attaque du courant est plus faible. Un tapis de plantes basses, par ex. d'herbes appropriées, peut donc être prévu dans ce secteur si l'on ne veut pas, pour des raisons financières, renoncer totalement, dans les premiers temps, à une protection.

4.3.4 Epis de fond et panneaux de fond

4.3.4.1 But et effet

a) Epis de fond

Les épis de fond sont des ouvrages transversaux qui réduisent la hauteur de la section mouillée. Ils servent à la fixation du fond du fleuve et sont placés dans les secteurs fortement menacés par l'attaque du courant. Les épis de fond sont souvent construits en groupes et en liaison avec des épis. Dans ce cas, l'épi de fond est placé entre les têtes de deux épis opposés.

Entre les épis de fond, le fond du fleuve et le niveau d'eau s'abaisseront jusqu'à ce qu'un équilibre soit obtenu entre la résistance du fond et l'attaque de l'eau. Pour des épis de fond élevés et un faible débit, un changement du type d'écoulement peut se produire, entraînant un affouillement en aval de l'épi de fond et une forte perturbation du trafic fluvial. En vue d'éviter cette situation, les distances entre les épis de fond devront être faibles et des panneaux de fond devront être prévus sur une longueur suffisante, en amont et en aval du groupe d'épis.

L'utilisation d'épis de fond devrait être absolument examinée dans un modèle hydraulique, afin de déterminer avec la précision requise leur effet dans chacun des cas.

b) Panneaux de fond

Les panneaux de fond sont construits en empierrement. Les pierres sont placées - en cas de besoin - sur une couche filtrante. Cette protection est généralement limitée aux endroits qui ont été auparavant remblayés avec des matériaux de dragage.

4.3.4.2 Construction

Les épis de fond sont construits de sorte que leur crête soit située suffisamment au-dessous du fond théorique du lit du fleuve. La crête aura une largeur de 1,0 à 2,5 m. L'inclinaison du talus côté amont est de 1:2 et celle du talus côté aval est de 1:3. Si l'épi de fond traverse toute la largeur du fleuve ou du chenal navigable, la crête sera exécutée horizontalement ou aura une légère inclinaison en direction de l'axe du chenal.

u5

4.3.4.3 Matériaux de construction

a) Epis de fond

Seules des pierres peuvent être utilisées pour la construction d'épis de fond, car ceux-ci doivent être réalisés sous l'eau. Du gravier devrait être employé comme couche filtrante.

b) Panneaux de fond

Du ballast sur du gravier-filtre ou un mélange de ballast et de gravier résistant à la force tractrice lors de la crue peut être utilisé pour les panneaux de fond. Des nappes filtrantes ne devraient, en aucun cas, être employées pour le fond, car elles compliqueraient d'éventuels travaux de dragage actuellement imprévisibles.

Les dimensions et la nature des matériaux pour les panneaux de fond dépendent de la force tractrice.

Pour des secteurs de fleuve rectilignes, la force tractrice est de:

$$F_t = 10 \cdot R \cdot J$$

ou, pour $B > 30 T_p$, elle est de

$$F_t = 10 \cdot T_p \cdot J.$$

Dans cette formule:

F_t = force tractrice en N/m^2 ($1 N/m^2 = 0,1 kg/m^2$)

$R = A/U$ = rayon hydraulique

T_p = mouillage en m

J = pente de la ligne d'eau en o/oo

B = largeur du lit mineur en m.

Dans les courbes de faible rayon, la force tractrice est plus élevée en raison de l'augmentation de la vitesse dans ces secteurs. La force tractrice peut atteindre ici une valeur multiple de celle dans les secteurs rectilignes. Cet effet doit être pris en considération lors du comblement des affouillements.

Tableau 4.3.4.3: Valeurs limites empiriques de la force tractrice

Matériaux du fond	F_t en N/m^2
Sable compact et gravier fin	8 à 10
Argile colloïdale et limon	10 à 12,5
Gravier, $d = 5$ à 10 mm	12,5
Gravier, $d \leq 15$ mm	15 à 20
Cailloux, $d \leq 50$ mm	30 à 40
Cailloux, de 50 à 100 mm	40 à 60
Pierres de 100 à 500 mm	60 à 240
Pavés, suivant l'épaisseur	70 à 200
Perré, surface pavée	170

5. Bases du projet pour l'aménagement du fleuve Sénégal

5.1 Généralités

L'aménagement du fleuve Sénégal a pour but de réaliser un chenal navigable aussi large et profond que possible. Cette exigence est cependant limitée du point de vue économique.

Les bases essentielles du projet pour l'aménagement sont:

- les débits de régularisation et de référence,
- la profondeur du chenal navigable,
- la largeur du chenal navigable et les rayons des courbes.

Les débits de régularisation pour les différents mois et les différents tronçons du fleuve sont donnés dans l'étude sur le barrage de Manantali, compte tenu des intérêts de l'agriculture et de la production d'énergie.

Le débit de référence est le débit sur lequel est basé le projet d'aménagement de la voie navigable.

La profondeur et la largeur du chenal navigable sont déterminées compte tenu du débit de référence donné et des exigences de la navigation.

5.2 Débits de régularisation et de référence

5.2.1 Débits de régularisation conformément à l'étude du Groupement Manantali

5.2.1.1 Débits de régularisation, état définitif

Dans l'étude relative au barrage de Manantali, plusieurs cas ont été examinés du point de vue du débit de régularisation en faisant notamment varier:

- la cote de la retenue,
- les superficies agricoles à irriguer,
- la quantité d'énergie à produire et
- le débit à mettre à disposition de la navigation (débit résiduel).

L'alternative indiquée dans l'étude pour Manantali en tant que "cas 7" est particulièrement intéressante pour l'étude d'exécution pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation. Les détails relatifs aux débits de régularisation sont étudiés à l'art. 7 de la Mission A.1.1.

Pour le cas en question, les débits résiduels du fleuve indiqués au tableau 5.2.1.1 sont à la disposition de la navigation au cours des différents mois.

Tableau 5.2.1.1: Débits résiduels en m³/s le long du
fleuve selon le Groupement Manantali
pour le cas 7

Emplacement	PK	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Kayes	948	341	355	327	302	312	399	294	774	1787	1103	452	291
Bakel	816	352	358	326	299	309	414	425	1413	2657	1466	536	323
Moudéri	788	351	357	325	298	308	413	424	1412	2656	1465	535	322
Gouriki	702	330	334	305	280	293	387	397	1389	2643	1453	519	303
Thiépning	656	314	315	290	266	281	366	375	1368	2634	1444	507	288
Koundél	612	297	297	274	253	269	344	353	1351	2625	1436	495	273
N'Guidjilone	587	290	289	267	247	264	335	343	1343	2620	1432	489	266
Kerr	532	276	275	255	237	254	318	325	1329	2612	1425	479	254
M'Bagne	497	261	258	241	225	242	299	305	1313	2603	1417	468	240
Vending	490	232	228	217	204	221	262	266	1283	2587	1403	447	214
Dioudé Diabé ¹⁾	440	222	218	208	196	213	250	253	1274	2581	1398	440	205
Démèt ¹⁾	385	201	196	190	180	196	223	225	1254	2569	1387	424	186
Mafou ¹⁾	333	182	177	173	165	179	198	202	1236	2559	1377	410	170
Podor ¹⁾	266	165	160	159	153	165	177	181	1221	2550	1368	397	155
St - Louis	0	117	112	117	116	118	116	123	1181	2525	1339	360	112

Le calcul des débits du fleuve Sénégal indiqués au tableau 5.2.1.1 tient compte des apports du barrage de Manantali, du Bakoye et de la Falémé. Ces débits comprennent les prélèvements pour l'agriculture et les pertes par évaporation.

Ces débits ne seront pas atteints au cours de certaines années. La Mission A.1.1, art. 7.3.2.2 donne la probabilité de ces insuffisances de débit.

¹⁾ Les débits dans ce secteur comprennent ceux des bras Sénégal et Doué.

Sur le tronçon du fleuve entre Leboudou-Doué (PK 244) et Vending (PK 489), l'étude de Manantali n'a pas tenu compte de la répartition des débits entre les bras Sénégal et Doué. Selon les données existantes et les jaugeages effectués par le Groupement LDE, pour un débit de l'ordre de 100 à 300 m³/s, environ 55 % du débit total s'écoulent par le bras Sénégal.

5.2.1.2 Débit de régularisation, phase transitoire

Selon les renseignements fournis par le Groupement Manantali, les débits indiqués au tableau 5.2.1.2 peuvent être utilisés pour la phase transitoire PT 1, (voir également la Mission A.1.1, tableau 7.3.2.2 d)).

Tableau 5.2.1.2: Débits résiduels en m³/s le long du fleuve selon le Groupement Manantali, PT 1

Seuils	PK	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Kayes	948	256	243	241	228	226	208	281	2)	2)	2)	391	271
Bakel	816	271	249	243	228	225	227	417	-	-	-	477	302
Moudéri	788	270	248	242	227	224	226	416	-	-	-	476	301
Gouriki	702	262	239	233	219	217	216	406	-	-	-	469	293
Thiépning	656	257	232	227	214	212	208	398	-	-	-	465	288
Koundé	612	252	225	221	208	207	200	389	-	-	-	460	282
N'Guidjilone	587	249	222	218	206	205	197	385	-	-	-	458	279
Kerr	532	244	216	213	202	201	191	378	-	-	-	456	274
M'Bagne	497	239	210	208	197	196	185	371	-	-	-	451	269
Vending	490	231	201	201	191	190	174	360	-	-	-	445	262
Dioudé Diabé ¹⁾	440	227	197	197	187	186	169	355	-	-	-	442	258
Démèt 1)	358	219	189	190	181	180	160	345	-	-	-	437	251
Mafou 1)	333	212	182	183	175	173	151	338	-	-	-	432	246
Podor 1)	266	206	176	177	170	168	144	330	-	-	-	427	240
St. Louis	0	186	155	157	151	146	119	307	-	-	-	411	222

1) Voir page 5-3

2) Débits de crue suivant l'hypothèse de crue artificielle envisagée (voir Groupement Manantali: Rapport de Régularisation)

5.2.2 Débit de référence pour le projet¹⁾

Dans le "cas 7", les débits les plus faibles sont enregistrés au cours des mois de décembre à juillet. Pour l'élaboration du projet, les quantités d'eau du mois ayant le plus faible débit, à savoir celles du mois d'avril, seront prises comme débit de référence.

Au cours de la phase transitoire, le débit de régularisation est - à l'exception de St-Louis - plus faible que pour le cas définitif. Les plus faibles débits au cours de la phase transitoire auront lieu au mois de juin. Il sera étudié à l'art. 7 dans quelle mesure ce débit plus faible aura des incidences sur le mouillage utile.

5.3 Profondeur du chenal navigable et enfoncement²⁾

Pour un certain débit de référence, le choix de la profondeur du chenal navigable est déterminé par:

- les coûts des travaux d'aménagement et d'entretien de la voie navigable, d'une part, et
- les coûts de transport, d'autre part.

Ces facteurs de coûts ont un comportement contraire. Alors que les coûts des travaux d'aménagement s'accroissent considérablement au fur et à mesure que la profondeur augmente, les coûts de transport, quant à eux, décroissent. C'est pourquoi les coûts des travaux d'aménagement ont été calculés pour diverses profondeurs, afin de déterminer la profondeur à aménager adéquate.

Conformément à la Mission A.1.9, "Etude du Matériel de Transport", la profondeur à aménager doit avoir au moins 40 cm de plus que l'enfoncement. Afin de pouvoir garantir cette

1) Voir à ce sujet également l'article 12.1

2) Voir à ce sujet également l'article 12.6

profondeur, des marges de sécurité doivent être prises en compte pour l'exactitude des mesures et des calculs ainsi que pour des modifications de sol, qui ne sont pas à exclure.

Les majorations ont été appliquées pour le fleuve Sénégal à partir des récentes expériences faites en Allemagne lors de l'aménagement d'un fleuve (voir aussi la figure 5.3):

- majoration hydraulique:

$$\Delta T_{\text{hydr.}} = 0,05 \text{ m}$$

- majoration bathymétrique:

$$\Delta T_{\text{bath.}} = 0,10 \text{ m}$$

- majoration de sécurité pour la navigation:

. pour le sable:

$$\Delta T_{\text{SN}} = 0,15 \text{ m}$$

. pour les roches:

$$\Delta T_{\text{SN}} = 0,30 \text{ m.}$$

La profondeur du chenal navigable, également appelée profondeur nécessaire pour la sécurité de la navigation (T_{SN}), comprend, conformément à la figure 5.3:

- la profondeur de référence ($T_{réf.}$), ou profondeur à aménager (T_p), c'est-à-dire la profondeur mise à la disposition de la navigation et qui lui est communiquée,
- la majoration hydraulique ($\Delta T_{hydr.}$), qui tient compte de l'exactitude de la relation niveau d'eau - débit du calcul hydraulique,
- la majoration bathymétrique ($\Delta T_{path.}$), qui tient compte de la précision des mesures,
- la majoration de sécurité pour la navigation (ΔT_{SN}), qui compense les modifications du fond du fleuve.

En outre, seules des tolérances de dragage positives sont admissibles. Les hors-profils par endroits sont inutilisables pour la navigation mais influencent en revanche les calculs hydrauliques.

La profondeur de référence ($T_{réf.}$) résulte de l'enfoncement (T_e), en tenant compte de l'enfoncement supplémentaire du bateau navigant (ΔT_e), qui dépend du bateau et du type de convoi, des conditions de la navigation, etc. et du pied de pilote (ΔT_{pp}) nécessaire. Les marges ΔT_e et ΔT_{pp} seront prises en considération par une valeur de 0,20 m chacune. La profondeur de référence, ou profondeur à aménager, est ainsi supérieure de 0,40 m à l'enfoncement.

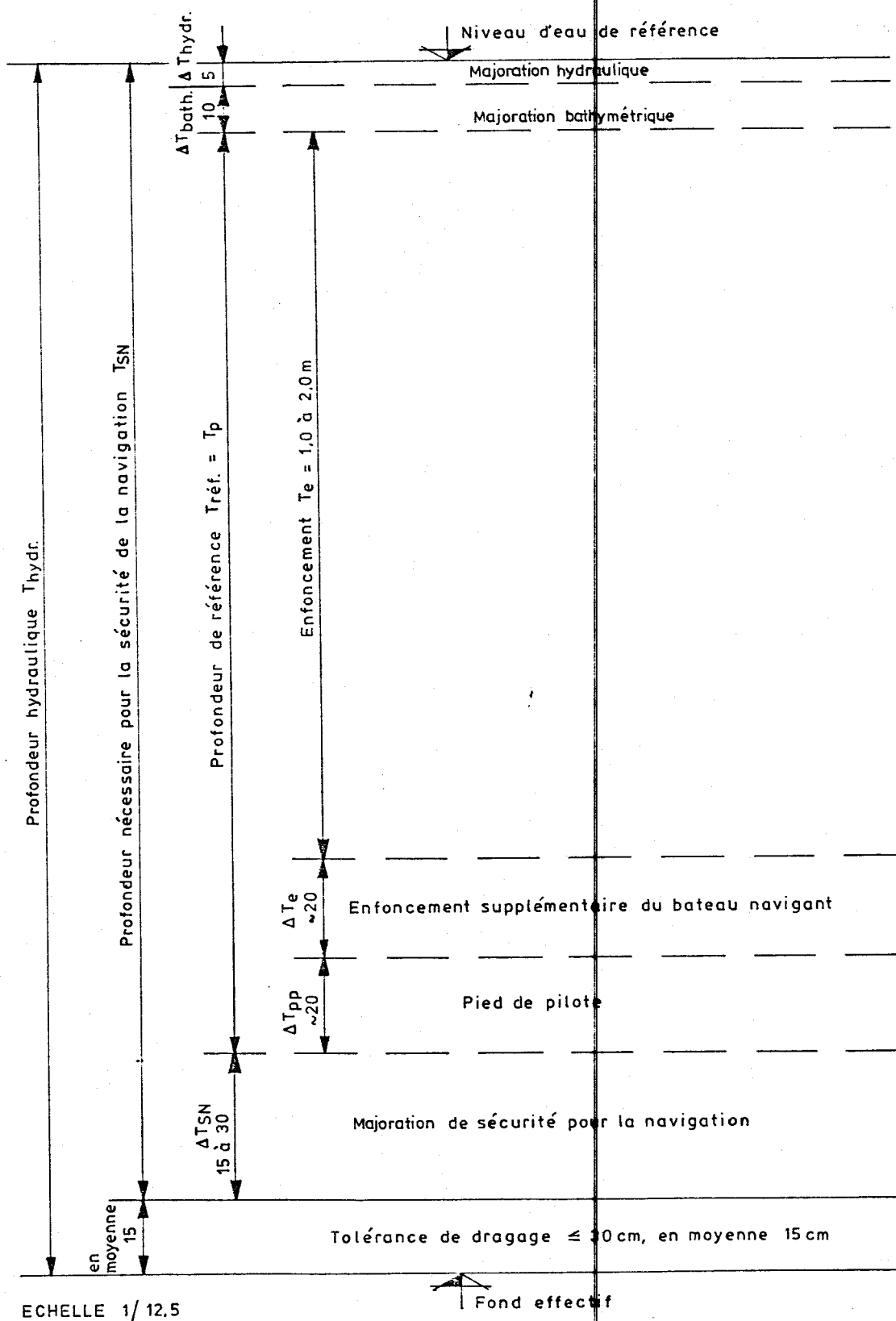


Fig. 5.3. Facteurs pour le calcul de la profondeur du chenal navigable

5.4 Largeur du chenal navigable et rayons des courbes

La largeur requise du fond du chenal navigable est déterminée par:

- les unités de bateaux mises en service,
- les rayons existants des courbes du fleuve,
- la largeur naturelle du lit mineur,
- la débit de référence et la profondeur du chenal navigable ainsi que par
- la densité du trafic.

Les exigences posées par la navigation, relatives à une largeur aussi grande que possible, sont, également ici, limitées du point de vue économique et hydrologique.

5.4.1 Unités de bateaux prévues

Dans la Mission A.1.9, "Etude du Matériel de Transport", des barges ont été prévues pour le transport sur le fleuve Sénégal et celles-ci ont les dimensions suivantes:

Longueur hors tout:	l_{ht}	= 55,00 m
Largeur aux couples:	b_c	= 11,40 m
Enfoncement constructif:	t_{ec}	= 2,00 m.

Ces barges peuvent être reliées en convois, conformément aux configurations indiquées à la figure 5.4.1:

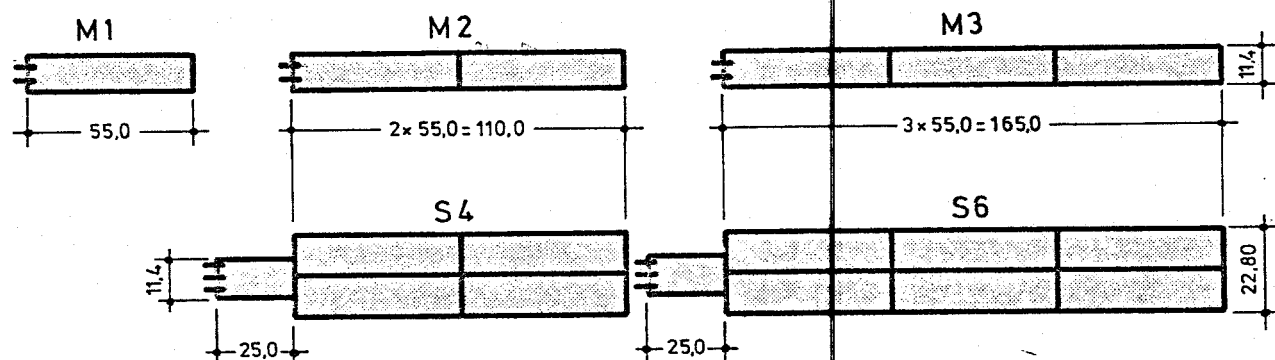


Figure 5.4.1: Configurations des convois poussés

5.4.2 Largeur du chenal navigable

Conformément à la Mission A.1.9, tableau 5.2.4, les largeurs suivantes du chenal sont nécessaires pour le croisement de deux convois de même type dans les tronçons rectilignes du fleuve:

- pour les unités M1, M2 et M3: $B_{vn} = 43 \text{ m}$
- pour les unités S4 et S6: $B_{vn} = 66 \text{ m}.$

Ces largeurs tiennent compte d'une marge de 20 m pour l'ensemble des distances de sécurité entre les bateaux et entre les bateaux et les berges.

La largeur du chenal navigable pour les unités du type S est, dans les tronçons rectilignes, d'environ 50 % supérieure à celle pour les convois du type M. Comme l'indique le tableau 5.4.3, cette relation existe également dans les courbes, indépendamment du rayon, pour les convois S6 et M3.

5.4.3 Elargissement dans les courbes

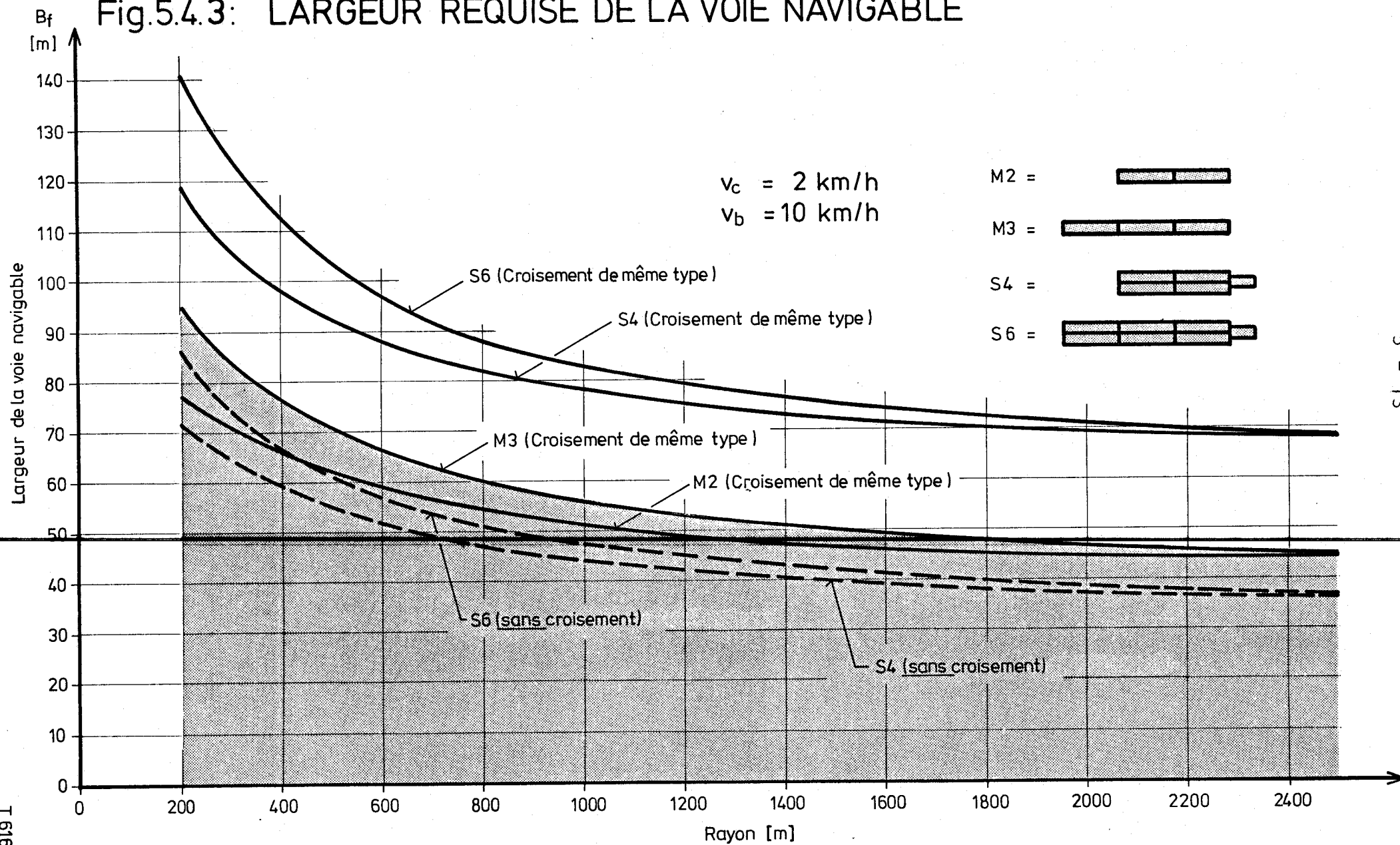
Les bateaux, notamment les "avalants", ont besoin d'une plus grande largeur dans les courbes que dans les tronçons rectilignes du fleuve. Ceci est représenté à l'annexe 10 de la Mission A.1.9. Les largeurs requises pour le croisement d'unités de même type en fonction des rayons de courbure sont également déterminées pour les convois M2, M3, S4 et S6 et elles sont récapitulées au tableau 5.4.3. Ces valeurs sont représentées à la figure 5.4.3.

On peut constater que, pour un rayon de courbure $R = 200$ m, c'est-à-dire le plus petit rayon de courbure du fleuve Sénégal, la largeur du chenal navigable doit être le double de celle des secteurs rectilignes.

Tableau 5.4.3: Largeurs requises du chenal navigable, en m

Rayon en m	M2 croisement de même type	M3 croisement de même type	S4 croisement de même type	S6 croisement de même type	S4 <u>sans</u> croisement (descente)	S6 <u>sans</u> croisement (descente)
R = 200	77	95	119	141	72	87
R = 400	65	76	98	112	58	66
R = 600	58	66	88	97	51	57
R = 800	55	60	82	88	46	51
R = 1 000	52	56	78	83	44	47
R = 1 200	49	53	75	79	42	45
R = 1 400	47	51	73	77	41	43
R = 1 600	46	49	72	75	40	42
R = 1 800	45	48	71	73	39	40
R = 2 000	45	46	70	72	38	39
R = 2 200	44	45	69	70	37	38
R = 2 400	44	45	68	69	36	37
R = ∞	43	43	66	66	35	35

Fig.5.4.3: LARGEUR REQUISE DE LA VOIE NAVIGABLE



5.4.4 Relation entre la profondeur et la largeur du chenal navigable

La relation existant entre le débit de référence et les dimensions - profondeur et largeur - du chenal navigable peut, pour un profil rectangulaire, être exprimée avec une précision suffisante par les formules suivantes:

$$Q = v \cdot A \quad (\text{équation de continuité})$$

$$v = k_s \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (\text{formule d'écoulement selon Manning-Strickler})$$

avec $R = T$ et $A = B \cdot T$, on obtient

$$B = \frac{Q}{k_s \cdot J^{1/2} \cdot T^{5/3}}$$

où

$$Q = \text{débit en m}^3/\text{s}$$

$$v = \text{vitesse moyenne d'écoulement dans un profil en travers, en m/s}$$

$$A = \text{section mouillée en m}^2$$

$$k_s = \text{coefficient de rugosité selon Manning-Strickler}$$

$$R = \frac{A}{U} = \text{rayon hydraulique en m}$$

(correspond, pour un fleuve large, à peu près à la profondeur moyenne T en m)

$$U = \text{périmètre mouillé en m}$$

$$J = \text{pente de la ligne d'eau}$$

$$B = \text{largeur de la section transversale en m}$$

$$T_p = \text{profondeur de la section transversale en m.}$$

Les figures 5.4.4 a) à c) indiquent les profondeurs en fonction de la largeur pour les divers débits, coefficients de rugosité et pentes.

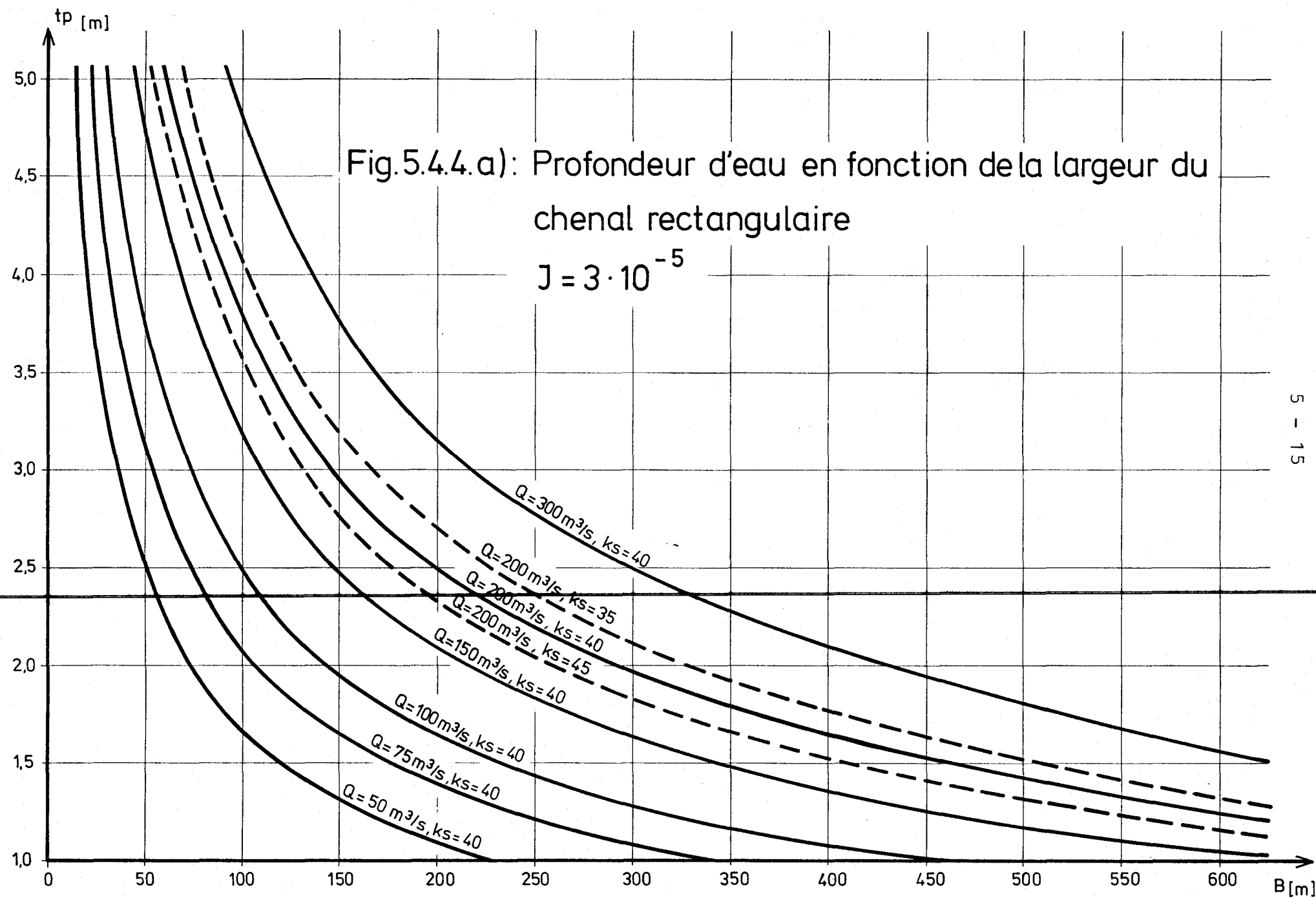


Fig. 5.4.4. b): Profondeur d'eau en fonction de la largeur du
chenal rectangulaire

$$J = 5 \cdot 10^{-5}$$

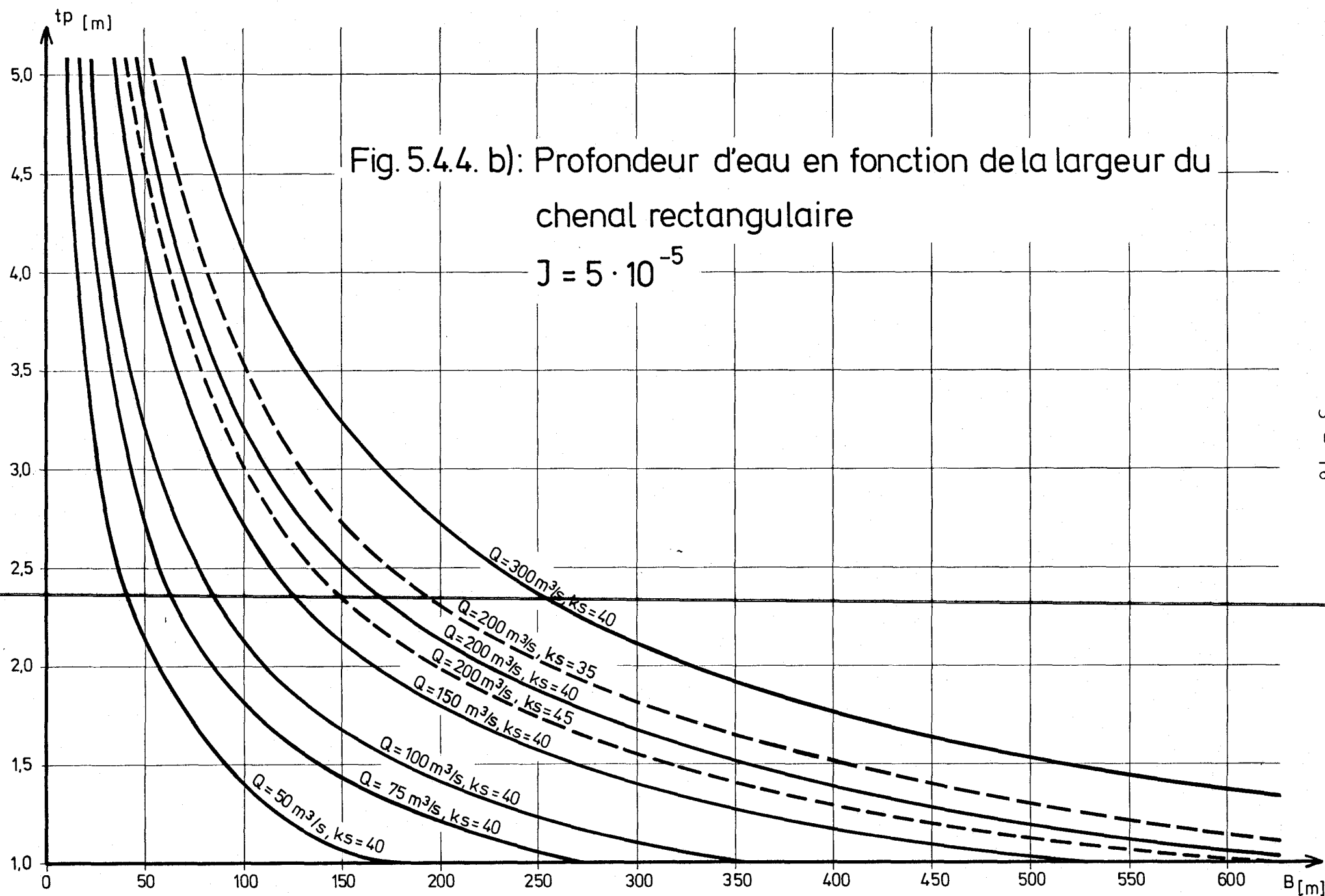
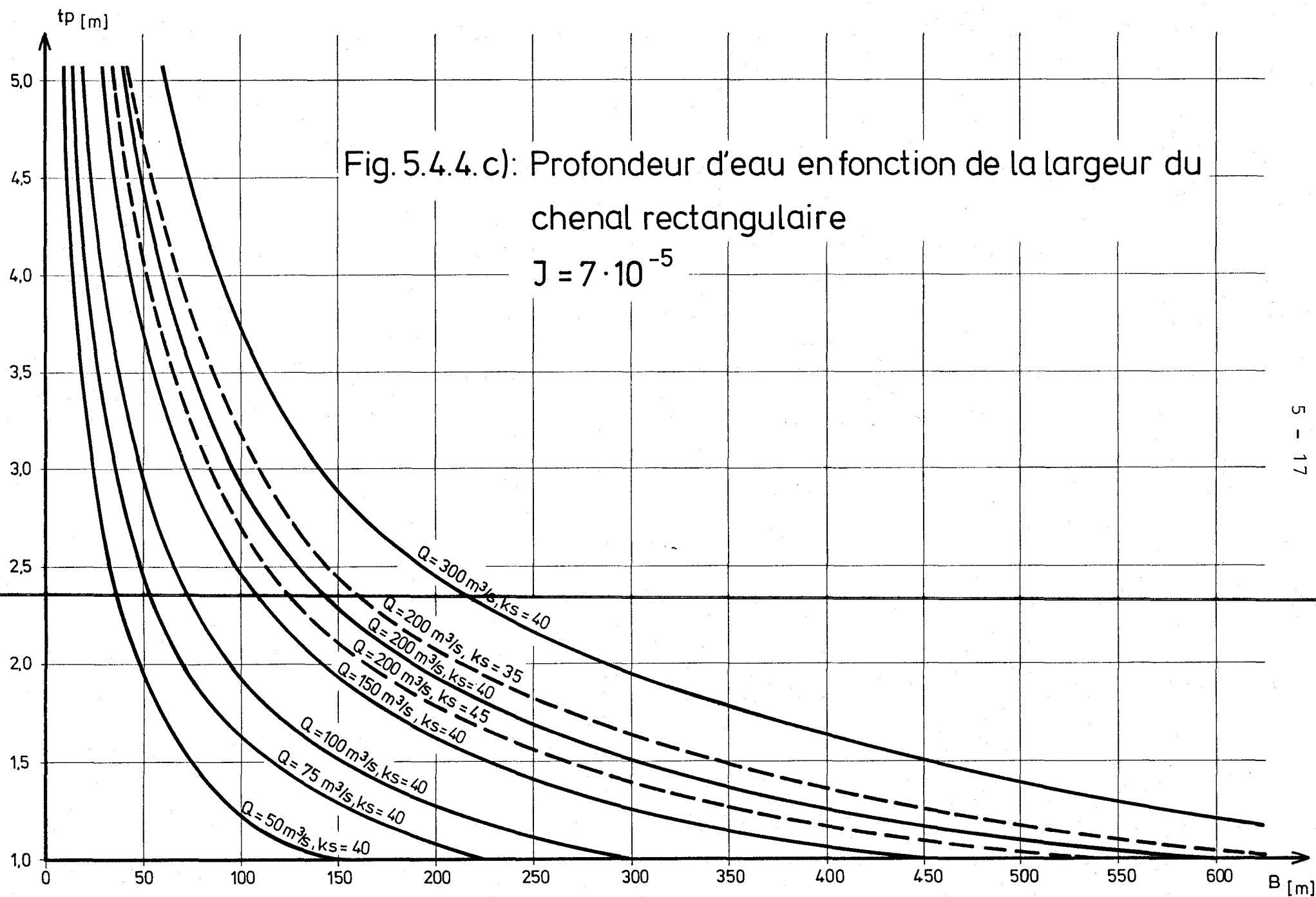


Fig. 5.4.4. c): Profondeur d'eau en fonction de la largeur du
chenal rectangulaire
 $J = 7 \cdot 10^{-5}$



5.4.5 Choix de la largeur du chenal¹⁾

Pour la 1ère phase d'aménagement, une largeur du chenal navigable sera choisie pour le fleuve Sénégal, permettant la circulation des convois M3. Il en résulte donc une

largeur normale de fond: $B_{f,n} = 55 \text{ m.}$

Cette largeur permet le trafic suivant:

- un croisement de convois M3 dans les courbes d'un rayon $\geq 1\,000 \text{ m,}$
- un croisement entre un convoi S6 et un convoi M3 dans les courbes d'un rayon $\geq 2\,200 \text{ m.}$

Dans les courbes d'un rayon $\leq 1\,000 \text{ m,}$ le chenal sera conçu suffisamment large de façon à permettre également le croisement des convois M3. Les largeurs du fond dépendent du rayon des courbes et elles sont indiquées à la figure 5.4.3.

Les largeurs choisies pour le chenal permettent également la circulation à voie unique des convois S6. Un croisement des convois S6 est cependant uniquement possible en dehors des seuils et sur le tronçon entre Le-boudou-Doué et Vending en dehors des passages resserrés en raison du lit mineur. Ce désavantage pourra être facilement accepté vu le volume du trafic escompté dans les premiers temps et la densité en résultant. Si le volume de transport et la densité du trafic augmentent fortement en l'espace de quelques années, de façon à justifier, du point de vue économique, la mise en service d'un plus grand nombre de convois S6, le chenal navigable pourra alors, selon les besoins, être élargi.

¹⁾ Voir également l'article 12.9.1

Dans la mesure où les limitations relatives à la mise en service du convoi S6 au cours de la phase initiale ne seraient pas admises, la largeur du chenal devra être à priori de 85 m. Les motifs suivants s'opposent cependant à une telle solution:

- Les coûts d'investissement et les coûts d'entretien augmentent plus que proportionnellement et ne sont, vu le volume de transport, pas justifiables.
- Atteinte est portée au principe selon lequel des aménagements du fleuve doivent être effectués avec beaucoup de précaution afin de ne pas modifier plus que nécessaire les conditions naturelles d'écoulement et d'éviter des conséquences imprévisibles.

5.4.6 Talus du chenal navigable

Les talus de dragage non protégés seront réalisés de sorte qu'une inclinaison de 1:5 puisse se former sans porter atteinte à la largeur du fond désirée.

Des talus protégés seront réalisés avec une inclinaison 1:3.

5.5 Débits moyens et débits de crue

Le projet du chenal navigable devra, en plus du débit de référence, tenir compte des débits moyens et des débits de crue.

5.5.1 Débits moyens

Le débit moyen est la moyenne arithmétique des débits journaliers pendant une période donnée. Dans le cas présent, le débit moyen sera défini comme la moyenne arithmétique des débits mensuels indiqués au tableau 5.2.1.1. Les débits moyens à l'emplacement des limnimètres sont réunis à l'art. 5.7.

5.5.2 Débit de crue

Les débits de crue sont indiqués au tableau 7.3.2.3 b) de la Mission A.1.1. Par souci d'exhaustivité, ces valeurs sont redonnées à l'art. 5.7 de la présente étude.

5.5.3 Plus hautes eaux navigables

Les plus hautes eaux navigables sont généralement déterminées par:

- la hauteur de passage sous les ponts,
- la vitesse du courant lors de la crue et
- le débordement du fleuve lors de la crue.

La vitesse d'écoulement du fleuve Sénégal est assez faible, même lors de la crue. La hauteur de passage sous les ponts et le repérage du lit mineur sont donc déterminants pour la définition des plus hautes eaux navigables.

Afin de ne pas devoir interrompre trop souvent la circulation fluviale lors de la crue, le niveau d'eau qui est atteint, en moyenne, tout au plus tous les deux ans devra être retenu pour les plus hautes eaux navigables.

Il en résulte donc pour les différents tronçons du fleuve - sans prise en considération de l'influence régulatrice du barrage de Manantali - le niveau d'eau indiqué pour F = 50 % à la Mission A.1.1, Annexe A.1.1-7.4. Pour Saldé et Boghé, en prenant pour base les conditions de Podor et Dagana, un niveau de 60 cm au-dessous de la pointe de crue de l'année hydrologique 1958/59 est considérée comme niveau des plus hautes eaux navigables. Par souci d'exhaustivité et de clarté, les niveaux d'eau sont récapitulés à l'art. 5.7.

L'effet de la régularisation du barrage de Manantali entraînera une réduction du niveau d'eau d'environ 2 m à Kayes et Bakel. L'influence est par contre négligeable pour le tronçon en aval de Matam.

5.6 Tirant d'air

5.6.1 Tirant d'air au-dessous des ponts

La cote inférieure des ponts et autres superstructures doit être au moins 8,5 m au-dessus des plus hautes eaux navigables.

Entre St-Louis et Podor où la circulation de caboteurs est possible, une hauteur de passage de 12,0 m au-dessus des plus hautes eaux navigables devrait être respectée si des caboteurs normaux doivent être mis en service. Du reste voir l'article 12.7.

5.6.2 Tirant d'air au-dessous des lignes aériennes

Des lignes électriques et téléphoniques aériennes croisant le fleuve sont, notamment pour le trafic nocturne

plus difficilement repérables que des ponts. A la différence des ponts, elles peuvent être en outre endommagées par les légères superstructures des bateaux, telles que: mâts de pavillon, antennes, etc. et constituent de leur côté un grand danger pour la navigation. C'est pourquoi toutes les lignes aériennes doivent être situées:

- en aval de Podor à au moins 20 m et
- en amont de Podor à au moins 15 m

au-dessus des plus hautes eaux navigables. Du reste voir l'article 12.7.

5.6.3

Recouvrement d'ouvrages et de conduites dans le lit du fleuve

Des conduites et câbles croisant le fleuve sont souvent placés dans le lit du fleuve.

Les câbles électriques et les conduites d'eau doivent avoir un recouvrement d'au moins 2,0 m. En cas de seuils, ce métrage doit être appliqué à un niveau théorique du fond en vue d'un approfondissement ultérieur. La position du fond est à supposer au moins à 3,0 m au-dessous du niveau d'eau de référence, s'il n'y a pas de danger d'affouillements. En cas de danger d'affouillements il faut prévoir un recouvrement plus épais ou un empierrement. De plus, des mesures appropriées devront être prises afin d'empêcher la remontée des conduites. Du reste voir l'article 12.7.

5.7 Résumé des données du projet

5.7.1 Débits et hauteurs des eaux

Lieu	PK	RQ en m ³ /s	MQ en m ³ /s	HQ _{3 rég} en m ³ /s	HQ _{100 red} en m ³ /s	HQ _{1000 red} en m ³ /s	PHEN en m IGN
Kayes	948	302	561	1.787	7.000	8.300	29,5
Bakel	816	299	740	2.657	8.300	9.900	22,2
Matam	637	259	698	2.630	6.500	7.700	15,5
Kaédi	542	238	672	2.613	-	-	12,6
Saldé	481	116	629 ¹⁾	2.586 ¹⁾	-	-	11,0
Boghé	382	102	602 ¹⁾	2.568 ¹⁾	-	-	8,8
Podor	266	88	570 ¹⁾	2.550 ¹⁾	-	-	5,4
Dagana	169	139	555	2.541	3.200	3.800	3,4
St-Louis	0	116	528	2.525	-	-	-

1) Ces débits dans ce secteur comprennent ceux du bras
Sénégal et du Doué

RQ = Débit de référence, avril, cas 7

MQ = Débit moyen

HQ_{3 rég} = Débit de la crue régularisée, cas 7,
mois de septembre

HQ_{100, red.} = Débit de la crue centennale après régularisation

HQ_{1000 red.} = Débit de la crue millénaire après régularisation

PHEN = Plus hautes eaux navigables.

5.7.2 Dimensions du chenal navigable

Profondeur hydraulique du chenal navigable:

Les profondeurs suivantes ont été examinées:

1,5, 2,0, 2,5 et 3,0 m.

Largeur du fond du chenal navigable

Rayon de courbure en m	Largeur du fond en m pour les convois M3 (1ère phase d'aménagement)	Largeur du fond en m pour les convois S6
≥ 1 000	55	85 ¹⁾
800	60	88 ¹⁾
600	66	97
400	76	112
200	95	141

1) Dans les secteurs rocheux et pour $T_{\text{réf.}} = 2,5$ m, une largeur de 90 m est préférable ou bien T_p doit être augmenté à 2,6 m.

Inclinaisons des talus:

non protégé	1:5
protégé	1:3
rocheux	1:1.

6. Avant-projet pour les travaux d'aménagement

6.1 Données de base

Les données les plus importantes pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation sont les données:

- hydrologiques
- topographiques
- géologiques et de mécanique des sols.

Ces données ont été en partie tirées des études disponibles et elles ont été complétées ou déterminées par des mesures du Groupement Lackner - Dorsch - Electrowatt.

6.1.1 Données hydrologiques

Une grande partie des données hydrologiques requises pour le projet a pu être tirée des études disponibles. Le Groupement LDE a effectué essentiellement des mesures pendant la décrue et celles-ci avaient pour but d'obtenir des informations supplémentaires pour de faibles débits qui correspondent approximativement aux débits de régularisation du barrage de Manantali. Ces données étaient jusqu'à présent insuffisantes ou ne présentaient pas la précision requise.

Au cours des mesures in situ, les éléments suivants ont été déterminés pour des tronçons et des sections caractéristiques du fleuve:

- les vitesses et partiellement les directions de courant,
- les débits,

- la pente de la ligne d'eau,
- la granulométrie des matériaux du fond et
- la contenance de matériaux en suspension.

Les données hydrologiques nécessaires pour l'avant-projet sont réunies dans la Mission A.1.1 "Actualisation des données".

6.1.2 Données topographiques

Des travaux topographiques et bathymétriques ont été réalisés sur le fleuve Sénégal entre Leboudou-Doué et Kayes et sur le bras Doué dans le cadre des Missions A.1.2 et B.1.1.

Ces travaux comprenaient notamment:

- une couverture aérienne lors de l'étiage à l'échelle de 1 / 40 000,
- une couverture aérienne des seuils lors de l'étiage à l'échelle de 1 / 5 000,
- un cheminement le long des berges en planimétrie et altimétrie,
- le levé bathymétrique du lit du fleuve.

Les résultats de ces travaux ont permis de construire et d'élaborer:

- un modèle digitalisé du lit mineur,
- les plans à l'échelle 1 / 20 000,
- le profil en long du talweg à l'échelle 1 / 20 000 sur 1 / 100,

- les profils en travers à l'échelle 1 / 2 000 sur 1 / 500 et
- les plans de détail à l'échelle 1 / 2 000 et 1 / 1 000.

6.1.3 Données géologiques et de la mécanique des sols

La Mission B.2 comprend une étude des caractéristiques des sols dans le secteur des seuils et une détermination des gisements de matériaux de construction. Les résultats de ces examens sont donnés dans le rapport sur la Mission B.2, Etude des sols.

6.1.4 Autres données

En plus des données indiquées aux art. 6.1.2. et 6.1.3, il convient de mentionner:

- la Mission A.1.1: Actualisation des Données,
- la Mission A.1.7: Etude et Recherche des Prix unitaires,
- la Mission A.1.9: Etude du Matériel de Transport,
- la Mission A.1.11: Organisation d'une Compagnie Inter-Etats de Navigation et
- la Mission A.1.14: Organisation de la Direction de la Voie Navigable.

6.2 Moyens pour l'étude du projet

6.2.1 Modèle mathématique

Le modèle mathématique est dans le cas présent un des principaux moyens de travail utilisés pour l'élaboration

du projet. Le résultat le plus important fourni par le modèle mathématique est la hauteur d'eau pour différents débits et donc le mouillage du chenal navigable sur le tronçon entre l'embranchement du Doué et Kayes, aussi bien avant qu'après l'aménagement. Le volume de déblaiement (dragage et dérochement) a été également déterminé pour différentes profondeurs du chenal navigable.

Le modèle mathématique utilise comme données de base:

- la forme naturelle du lit du fleuve et
- la rugosité du lit.

Le modèle a été ainsi jaugé en utilisant les courbes d'étalonnage. Les hauteurs de la ligne d'eau ont été ensuite calculées tous les kilomètres pour différents cas prévoyant une variation

- des débits,
- des mouillages du chenal et
- des cotes de retenue du barrage de Diama.

Les hauteurs d'eau ont été calculées pour des intervalles plus resserrés dans les secteurs présentant de fortes modifications de la section.

La Mission A.1.4 comprend une description détaillée du fonctionnement du modèle mathématique et le tableau 6.2.1 récapitule les cas étudiés.

Tableau 6.2.1: Cas de calcul pour le modèle mathématique

Cas	Débit	Cote du fond du chenal navigable	Mouillage du chenal navi- gable en m	Cote de retenue du barrage de Diama en m IGN
1	Cas 7 du GM ¹⁾ mois d'avril	Etat naturel	-	Sans barrage
2	Cas 7 du GM mois d'avril	Etat naturel	-	1,50
3	Cas 7 du GM mois d'avril	-	1,50	1,50
4	Cas 7 du GM mois d'avril	-	2,00	1,50
5	Cas 7 du GM mois d'avril	-	2,50	1,50
6	Cas 7 du GM mois de janv.	cf. Cas 4	à étudier	1,50
7	Cas 7 du GM mois de janv.	cf. Cas 3	à étudier	1,50
8	PT 1 du GM mois de juin	cf. Cas 4	à étudier	1,50
9	Cas 7 du GM mois d'avril	cf. Cas 4	à étudier	2,50
10	Cas 7 du GM mois d'avril	-	3,00	1,50

1) GM = Groupement Manantali

La hauteur de la ligne d'eau pour le lit naturel du fleuve lors du débit de référence a été calculée dans les cas 1 et 2.

Dans les cas 3 à 5 et le cas 10, la hauteur de la ligne d'eau et les volumes de déblaiement (dragage et dérochement) ont été déterminés pour le débit de référence et pour les mouillages d'aménagement du chenal navigable de 1,5, 2,0, 2,5 et 3,0 m. Dans les quatre cas, la cote de retenue du barrage de Diama était de +1,50 m IGN.

Les cas 6 et 7 ont été calculés pour déterminer l'influence de l'augmentation du débit sur la hauteur de la ligne d'eau et le mouillage. La position du fond du chenal navigable a été fixée conformément aux cas 3 et 4. Le débit du mois de janvier a été choisi, car il est atteint ou dépassé pendant environ 8 mois de l'année. Dans le cours supérieur du fleuve, le débit du mois de janvier est d'environ $50 \text{ m}^3/\text{s}$ supérieur à celui du mois d'avril. Si l'aménagement du chenal navigable est effectué conformément au cas 3 ou 4, un plus grand mouillage, qui permettra à son tour un plus grand enfoncement, sera donc atteint pendant cette période en raison du plus fort débit.

Le cas 8 a étudié le mouillage utilisable pour le débit du mois de juin pendant la phase transitoire si le fond du chenal est réalisé conformément au cas 4.

Dans le cas 9, l'influence sur le mouillage utilisable du relèvement de 1,0 m de la cote de retenue du barrage de Diama à +2,50 m IGN a été étudiée pour un chenal navigable réalisé conformément au cas 4.

Les résultats des cas 6 à 9 du modèle mathématique sont donnés et commentés à l'article 7.

6.2.2 Modèles hydrauliques

Les modèles hydrauliques examinent des secteurs limités du fleuve qui devront être aménagés par des ouvrages ou des travaux particuliers.

Ces essais sur modèles réduits sont utilisés en tant que complément au modèle mathématique, dans les cas où le modèle mathématique ne peut fournir des résultats suffisamment détaillés. En outre, la disposition et la construction des ouvrages de correction, nécessaires pour obtenir un but d'aménagement fixé, devront être déterminées par des modèles hydrauliques.

Les résultats des mesurages d'écoulement effectués dans le modèle permettent, en outre, certaines conclusions qualitatives sur les érosions et les alluvionnements survenant à l'état naturel.

Pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation, des essais sur modèles réduits seront tout d'abord effectués pour:

- l'embranchement du Doué,
- la barrière rocheuse de Diawara et
- le seuil rocheux de Tamboukané.

Les résultats des essais sur modèles réduits sont commentés dans la description des travaux d'aménagement de chaque secteur.

(1) Embranchement du Doué (PK 489)

Il devrait être étudié dans ce modèle si la construction des ouvrages dans l'embranchement du Doué augmenterait le débit s'écoulant dans le bras Sénégal

et si, par là, des coûts d'aménagement pour le bras Sénégal pourraient être économisés. Les ouvrages devaient, dans ce cas, être disposés et construits de façon que la navigation locale entre le bras Doué et le fleuve Sénégal ne soit pas gênée, et de plus, que des barges automotrices du type M1 puissent également être mises en service, en cas de besoin, sur le bras Doué.

(2) Barrière rocheuse de Diawara (PK 793)

Près de Diawara, le tracé régulier du fleuve Sénégal est considérablement perturbé par une presqu'île rocheuse sur la rive gauche et par un îlot rocheux dans le fleuve.

Le but du modèle hydraulique était de déterminer les modifications de la pente de la ligne d'eau qu'entraîne l'enlèvement partiel des barrières rocheuses. Il devrait être de plus étudié si, pour la sécurité de la navigation, des ouvrages de correction sont nécessaires devant et entre les rochers afin d'éviter des courants transversaux.

(3) Seuil rocheux de Tamboukané (PK 920 à 923)

Près de Tamboukané, le lit du fleuve est large et son fond est rocheux. Pour de faibles débits, l'eau se répartit sur toute sa largeur, de sorte que le mouillage est très faible dans ce secteur. Ce seuil est d'autre part caractéristique pour les autres secteurs rocheux entre Ambidédi et Kayes. Les études effectuées sur le modèle hydraulique doivent permettre de déterminer si le mouillage réalisé par abaissement du fond du fleuve au cours des travaux d'aménagement peut être augmenté de 0,5 m par la construction ultérieure d'ouvrages de correction.

6.3 Tracé du chenal navigable

6.3.1 Talweg

Le talweg d'un fleuve est la ligne joignant les points les plus bas du lit d'un fleuve. Etant donné que le fond du fleuve Sénégal présente par endroits de forts champs de dunes, le talweg aurait, en appliquant sa définition théorique, un tracé en zigzag dans de tels secteurs. Une telle interprétation ne serait cependant pas convenable car les dunes se déplacent. Les dunes ont donc été négligées lors de la détermination en plan du talweg de sorte qu'un tracé moins sinueux et convenable du point de vue technique soit obtenu.

6.3.2 Axe du chenal navigable

L'axe du chenal navigable d'une largeur normale de 55 m ou d'une largeur correspondant au rayon des courbes, a été déterminé dans les tronçons à aménager selon les critères suivants:

- (1) L'axe du chenal navigable doit correspondre le plus possible au talweg afin de perturber le moins possible l'équilibre existant du fleuve.
- (2) Le chenal navigable doit être situé dans le profil en travers de sorte qu'un dragage des berges du lit mineur ne soit pas nécessaire.
- (3) Le volume de dragage d'une section doit être limité à un minimum, même pour la réalisation d'un chenal de 2,5 m de profondeur.
- (4) Le bord du chenal navigable doit être assez éloigné de la berge pour permettre, même pour le plus grand mouillage prévu de 2,5 m, également l'adoucissement ultérieur de la pente et la protection de la berge, sans que cela entraîne un rétrécissement de la largeur du chenal (voir figure 6.3.2).

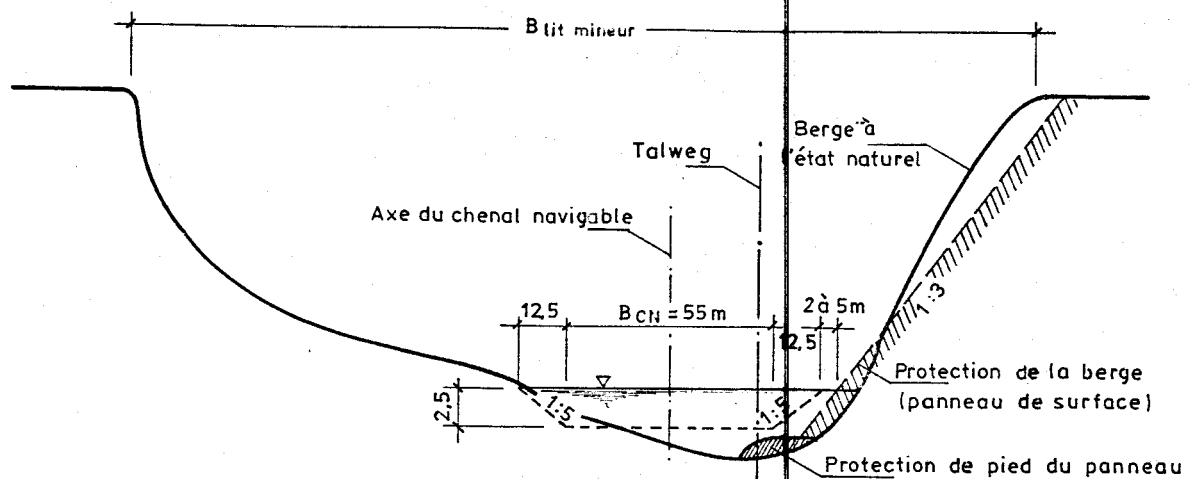


Figure 6.3.2: Position convenable du chenal navigable

- (5) Dans les coudes d'un rayon inférieur à 1 000 m, pour lesquels un élargissement du chenal est nécessaire, cet élargissement devra être effectué sur une longueur qui est au moins triple de l'élargissement.
- (6) Le chenal navigable doit avoir un tracé favorable du point de vue nautique, afin de permettre aux pilotes de suivre le cours avec le moins de signaux de balisage possible.

6.4 Explications relatives à l'avant-projet

6.4.1 Généralités

L'avant-projet a pour objectif d'expliquer les possibilités de la réalisation d'un chenal navigable utilisable toute l'année et présentant une largeur et un mouillage suffisants. Les travaux d'aménagement nécessaires pour des mouillages de 1,5 à 3,0 m seront déterminés sur la base du débit de référence.

Les études suivantes feront en outre varier:

- la cote de la retenue du barrage de Diama, à savoir:
 - cote de retenue à $\pm 0,0$ IGN, c'est-à-dire que le réservoir est vide. Ce cas est étudié par le cas 1 du

modèle mathématique (sans le barrage de Diama),

- cote de retenue à +1,5 m IGN,
- cote de retenue à +2,5 m IGN,
- les débits, à savoir:
 - débit de référence,
 - débit du mois de janvier, conformément au cas 7 du Groupement Manantali,
 - débit du mois de juin, conformément à la phase transitoire PT 1 du Groupement Manantali.

Pour les travaux d'aménagement à réaliser, une différence est faite entre:

- le dragage,
- le dérochement et
- la construction d'ouvrages.

Les résultats du modèle mathématique montrent que l'influence de la retenue du barrage de Diama atteint:

- le PK 530 pour une cote de retenue de +1,5 m IGN et
- le PK 540 pour une cote de retenue de +2,5 m IGN.

A l'extrémité de la retenue hydrostatique qui se trouve au PK 402 pour une cote de retenue à +1,5 m IGN, le niveau d'eau monte d'environ 0,5 m pour l'écoulement du débit de référence.

Le niveau d'eau augmente également d'environ 0,5 m à l'extrémité de la retenue hydrostatique située à peu près au PK 440 pour une cote de retenue de +2,5 m et l'écoulement du débit de référence.

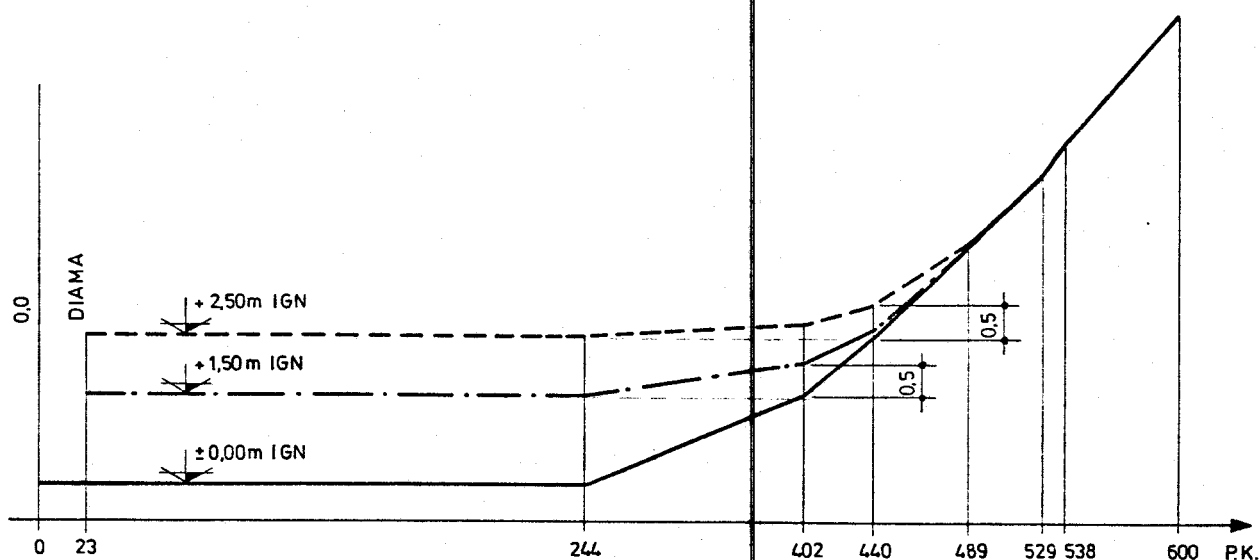


Figure 6.4.1: Augmentation du niveau d'eau par le barrage de Diama

6.4.2 Division du fleuve en tronçons

Pour la description des travaux d'aménagement, le fleuve est divisé en tronçons comme suit:

- (1) Chenal d'accès à St-Louis
- (2) St-Louis (PK 0) à Leboudou-Doué (PK 244)
- (3) Leboudou-Doué (PK 244) à Vending (PK 489)
- (4) Vending (PK 489) à Matam (PK 637)
- (5) Matam (PK 637) à Bakel (PK 816)
- (6) Bakel (PK 816) à Ambidédi (PK 905)
- (7) Ambidédi (PK 905) à Kayes (PK 948)
- (8) Bras du Doué (PK 0 à PK 228)

6.4.3 Embouchure en aval de St-Louis

Le tronçon d'embouchure en aval de St-Louis a une longueur d'environ 23 km et une largeur de 500 à 600 m. Conformément à l'Atlas Nautique, ce secteur est navigable sans difficulté, à l'exception du secteur de la barre. En de-

hors de ce dernier, la cote du fond se situe environ entre -5,5 et -8,0 m IGN. Dans les plans de l'Atlas Nautique, les profondeurs sont données par rapport à un niveau d'eau de référence qui est pour ce tronçon à -0,45 m IGN. Cela signifie que les profondeurs indiquées sur les plans doivent être majorées de 45 cm en aval de St-Louis pour obtenir les cotes IGN.

Selon l'Atlas Nautique, la profondeur au-dessus de la barre varie entre 2 et 5 m selon la saison et la phase de la marée. Les plus grandes profondeurs ont été enregistrées au cours des mois de juin et juillet, puis elles diminuent pour atteindre un minimum de 2 m en septembre.

Les vitesses de courant dépendent du débit fluvial, de la marée et du point de mesures et atteignent entre 3,6 et 7,4 km/h. [31] et [32].

Selon les sources d'informations citées ci-dessus, la période la plus favorable pour le passage de la barre est entre mai et août. De décembre à avril, le passage de la barre est très difficile en raison du faible mouillage et de la houle.

Un trafic régulier au moyen de barges, de remorqueurs ou même de caboteurs n'est donc actuellement pas possible entre St-Louis et les port voisins.

La construction d'un nouveau port près de St-Louis et l'aménagement d'un chenal d'accès sont prévus notamment dans le cadre des projets de développement du bassin du fleuve Sénégal. L'article 6.5 de la Mission A.1.1 donne de plus amples détails à ce sujet. La profondeur du chenal d'accès devra garantir un tirant d'eau de 8,20 m à 8,75 m. Après l'achèvement du chenal d'accès, tous les bateaux prévus pour le trafic sur le fleuve Sénégal pourront circuler sans difficulté entre la mer et le fleuve.

6.4.4 St-Louis (PK 0) à Leboudou-Doué (PK 244)

6.4.4.1 Généralités

L'exécution de levés topographiques et bathymétriques pour ce tronçon n'était pas prévue dans le cadre de l'étude pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation.

C'est pourquoi l'appréciation de la navigabilité sur ce tronçon est basée sur les études d'Ivanov [1] et de Beziukov [6] ainsi que sur les informations de l'Atlas Nautique basées sur ces études.

En amont du PK 4, l'Atlas Nautique n'indique cependant que les mouillages existants à peu près au milieu du fleuve. Des lignes de profondeur n'existent que pour les escales portuaires de Rosso, Richard Toll et Dagana. De plus, certains seuils marqués sur les plans avec l'indication de leur mouillage ne sont pas portés dans la liste des seuils donnée à la page 3 de l'Atlas Nautique. Il s'agit des secteurs entre:

- PK 109 et PK 110, Ronq, $T_p = 4,0$ m et
- PK 230 et PK 231, Pendao, $T_p = 3,9$ m.

6.4.4.2 Tracé du fleuve

Le cours du fleuve dans ce tronçon est assez sinueux, comparé à celui d'autres tronçons du fleuve. Le coefficient de sinuosité ⁺⁾ est de 1,5 environ. Les coudes qui ont un rayon de courbure inférieur à 1 000 m sont récapitulés au tableau 6.4.4.2. Ce tableau indique que 2 coudes d'un rayon de l'ordre de 450 m et 17 coudes d'un rayon de 550 à 950 m existent sur ce tronçon.

⁺⁾ Le coefficient de sinuosité est le quotient de la longueur réelle du fleuve entre deux points et de leur distance en ligne droite.

Tableau 6.4.4.2: Coudes d'un rayon inférieur à 1 000 m

PK	Rayon R en m				
	500	500 - 600	600 - 700	700 - 800	800 - 1000
6,5	-	-	-	-	900
11,5	-	-	-	750	-
26,6	-	-	-	800	-
54,1	-	-	700	-	-
55,0	-	-	-	800	-
64,3	-	550	-	-	-
92,3	-	-	700	-	-
109,0	-	-	-	-	900
109,7	-	-	-	750	-
123,7	-	-	700	-	-
124,2	450	-	-	-	-
142,8	450	-	-	-	-
143,7	-	-	700	-	-
151,0	-	-	-	-	950
168,4	-	-	-	800	-
214,7	-	-	-	-	900
215,7	-	-	700	-	-
233,0	-	-	-	-	900
238,7	-	-	-	-	850
Nombre	2	1	5	5	6

6.4.4.3 Largeur du lit mineur

Conformément aux plans de l'Atlas Nautique, la largeur du lit mineur est dans ce tronçon de 150 à 600 m. Cependant, ni l'Atlas Nautique ni aucun rapport n'indiquent la largeur utilisable par la navigation. Seul Ivanov [1] a donné les mouillages dans les secteurs des seuils pour une largeur de chenal de 30 m et un débit de $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Les plans bathymétriques des escales portuaires de Rosso, Richard Toll et Dagana permettent de conclure que les largeurs suivantes existent à ces endroits pour un mouillage d'au moins 2,5 m.

- Rosso: > 100 m, mouillage maximum d'env. 11 m,
- Richard Toll: > 110 m, mouillage maximum d'env. 13 m,
- Dagana: > 120 m, mouillage maximum d'env. 8 m.

Une gêne de la navigation due à une largeur insuffisante n'étant pas indiquée, on peut supposer que le mouillage désiré de 2,5 m existe sur la largeur prévue du chenal navigable.

Des profils en travers pris dans ce tronçon dans le cadre de l'"Evaluation des Effets sur l'Environnement" et pouvant être consultés ne donnent également aucune indication sur les largeurs ou les profondeurs insuffisantes.

Afin de pouvoir donner de plus amples détails à ce sujet, des travaux topographiques et bathymétriques devraient être réalisés sur ce tronçon.

Le lit du fleuve est nettement dessiné pendant l'étiage. Les rives sont 2 à 3 m dans la partie en aval et 5 à 6 m dans la partie en amont au-dessus du niveau de référence.

6.4.4.4 Mouillages

Les mouillages indiqués sur les plans de l'Atlas Nautique se rapportent aux hauteurs d'eau suivantes pour un débit de $150 \text{ m}^3/\text{s}$:

- St-Louis (PK 0): -0,45 m IGN
- Rosso (PK 130): -0,05 m IGN
- Richard Toll (PK 142): $\pm 0,00$ m IGN
- Dagana (PK 167): +0,07 m IGN.

Conformément à l'Atlas Nautique, un mouillage de 2,6 m à 15 m existe sur ce tronçon. Le tableau 6.4.4.4 a) indique les points pour lesquels le mouillage est inférieur à 5 m pour le débit précité.

Tableau 6.4.4.4 a): Mouillages inférieurs à 5,0 m
entre le PK 0 et le PK 244 ²⁾
(sans le barrage de Diama)

N° du seuil	PK ¹⁾	Emplace- ment	Mouillage en m				
			2,5 à 3,0	3,0 à 3,5	3,5 à 4,0	4,0 à 4,5	4,5 à 5,0
1	109,3	Ronq	-	-	-	4,0	-
2	112,8	Breune	-	-	-	-	4,8
3	143,4	Richard Toll	-	-	-	-	4,6
4	157,1	Raié	-	-	-	-	4,7
5	163,3 163,9	M'Bilor	- -	- -	- -	- 4,4	4,8 -
6	186,5 187,5 188,4 189,2	Bokhol - - -	- - 2,6 -	- 3,4 - -	3,8 - - -	- - - -	- - - 4,7
7	222,7	-	-	-	-	-	4,9
8	230,7	Pendao	-	-	3,9	-	-
9	243,8	Leboudou- Doué	-	-	-	4,4	-

¹⁾ Point kilométrique selon Beziukov.

²⁾ Source: Atlas Nautique.

A la suite de la régularisation par le barrage de Manantali, un débit de référence de l'ordre de $142 \text{ m}^3/\text{s}$ est attendu à l'endroit critique près de Bokhol. Ce débit n'est que légèrement inférieur à celui admis par Ivanov, de sorte que la réduction du mouillage en résultant peut être négligée.

Ceci permet de constater que les bateaux fluviaux prévus pourront circuler sur le tronçon St-Louis - Leboudou-Doué avec l'enfoncement total, c.-à-d. de 2,0 m.

Le mouillage de 4,0 m n'est pas atteint à 2 endroits et le mouillage de 5,0 m à 9 endroits.

Si des caboteurs doivent circuler toute l'année jusqu'à Podor, les 9 seuils indiqués au tableau 6.4.4.4 a) devraient être approfondis pour un enfoncement admis de 4,5 m, si le barrage de Diama n'est pas réalisé.

En raison de la retenue du barrage de Diama, le niveau d'eau entre Diama et Leboudou-Doué sera relevé à environ +1,5 m IGN pour une cote de retenue de +1,5 m IGN. Une profondeur d'environ 4,0 m existera ainsi près de Bokhol et d'environ 5,0 m et plus à d'autres endroits. Seul le seuil de Bokhol devra être aménagé en vue d'utiliser les caboteurs ayant un enfoncement de 4,50 m.

De faibles mouillages sont généralement enregistrés aux endroits où:

- le lit mineur est plus large que dans les tronçons avoisinants en amont et en aval,
- des marigots confluent ou
- des bifurcations du fleuve existent.

Le tableau 6.4.4.4 b) illustre ceci à l'aide de quelques exemples.

Tableau 6.4.4.4 b) : Causes de faibles mouillages

PK de - à	Elargissement du lit en m de - à	Diminution du mouillage en m de - à	Remarques
1,4 - 5	650 - 1200	9 - 5,5	St-Louis
25 - 26	350 - 800	11,4 - 7,1	Marigot de Deguen Ile de Ndiangal
33,7 - 36	280 - 600	10,1 - 5,2	-
37,9 - 38,7	250 - 600	8,6 - 6,5	Marigot de Dialam N'Diaye
79,1 - 82,5	250 - 800	12,4 - 5,2	Ile aux Caïmans
110,0 - 111,5	-	8,9 - 5,6	Marigot de Gorom Ouvrage d'irrigation
137,3 - 140,1	300 - 400	8,5 - 5,2	-
143,4 - 146,9	300 - 400	7,9 - 4,6	Bifurcation, Ile Bamba
163,9 - 165,2	450 - 650	6,5 - 4,4	Bifurcation, îlot
188,5 - 191,5	250 - 400	9,0 - 2,6	Bokhol
230,6 - 231,7	250 - 400	6,3 - 3,9	Bifurcation, îlot

6.4.4.5 Pont Faïdherbe

Le pont Faïdherbe à St-Louis PK 0 représente le plus important obstacle à la navigation. Une description des caractéristiques et du fonctionnement de ce pont est donnée à l'article 4.4.2.2 de la Mission A.1.1.

La construction d'un nouveau pont s'avère inévitable pour assurer une navigation régulière. Des études préliminaires à ce sujet sont déjà disponibles [8]. Tant que le trafic fluvial sera encore faible, le pont existant pourra être maintenu si des mesures sont prises,

permettant de réduire la durée d'ouverture et de fermeture du pont ou de prévoir des horaires fixes d'ouverture du passage.

6.4.4.6 Travaux d'aménagement à exécuter

L'ampleur des travaux d'aménagement à exécuter sur ce tronçon est déterminée par:

- la cote de retenue à Diama et
- les bateaux mis en service.

a) Travaux d'aménagement requis en cas de réalisation du barrage-écluse de Diama

Si le barrage de Diama est réalisé avec une cote de retenue à +1,5 m IGN, des travaux d'aménagement ne seront pas nécessaires pour la mise en service des convois de bateaux prévus. Les bateaux fluviaux peuvent circuler avec l'enfoncement total, c.-à-d. 2,0 m. Ceci est également possible si la cote de retenue descend temporairement jusqu'à +0,0 m IGN.

Le seuil de Bokhol devrait être supprimé par dragage, afin de permettre aux caboteurs ayant un enfoncement de 4,5 m de circuler jusqu'à Podor. Pour réduire le plus possible les volumes de dragage et permettre aux caboteurs de circuler également par une cote de retenue inférieure à +1,5 m IGN, le fond du fleuve devrait être déblayé dans ce secteur jusqu'à au moins -4,0 m IGN de façon à obtenir le même mouillage qu'à Pendao et Ronq.

b) Travaux d'aménagement requis sans réalisation
du barrage-écluse de Diama

Pour les types de bateaux fluviaux prévus, le mouillage est également suffisant si le barrage de Diama n'est pas réalisé.

Pour la mise en service de caboteurs ayant un enfoncement de 4,5 m, les 9 seuils indiqués au tableau 6.4.4.4 a) devraient cependant être supprimés. Le mouillage nécessaire devra alors être tout d'abord obtenu par des dragages. Le cas échéant, des ouvrages de correction pourraient être réalisés ultérieurement pour garantir le dégagement du chenal navigable.

6.4.4.7 Travaux d'aménagement à exécuter ultérieurement

Dans le cadre des travaux de construction à mettre au concours, des travaux d'aménagement ne sont pas nécessaires sur le tronçon St-Louis - Leboudou-Doué. Les endroits critiques pour la circulation de caboteurs devraient cependant être mesurés dans le cadre de l'exécution des travaux.

Le seuil de Bokhol, qui gêne la circulation des caboteurs, devrait être supprimé ultérieurement par dragage. Les bifurcations du fleuve pourraient être alors supprimées et des tronçons de fleuve particulièrement critiques pourraient être resserrés par des ouvrages de correction. L'aménagement est notamment prévu pour les tronçons suivants:

- | | |
|-------------------|--------------------|
| - PK 0 à PK 4 | - PK 143 à PK 146 |
| - PK 78 à PK 81 | - PK 186 à PK 190 |
| - PK 108 à PK 111 | - PK 227 à PK 231. |
| - PK 137 à PK 138 | |

6.4.5 Leboudou-Doué (PK 244) à Vending (PK 489)

6.4.5.1 Généralités

Sur ce tronçon, le fleuve se divise en deux bras: le bras Sénégal et le bras Doué. La répartition des débits à l'embranchement près de Vending (PK 489) a été déterminée à l'aide des courbes d'étalonnage disponibles (voir Mission A.1.1, annexes 7.41 et 7.42 et art. 7.6.3) et elle a été confirmée par des mesures du Groupement LDE ainsi que par le modèle mathématique. Pour les débits de référence à l'état naturel du lit du fleuve:

- 56 % du débit s'écoulent dans le bras Sénégal et
- 44 % dans le bras Doué.

Cette répartition ne varie pratiquement pas pour d'autres débits par basses eaux et pour les différentes phases d'aménagement.

Le Groupement Manantali n'a pas étudié séparément les débits de régularisation pour le bras Sénégal et le bras Doué. Les déterminations du niveau d'eau et du mouillage sont donc basées sur l'hypothèse de travail selon laquelle la diminution du débit due à l'irrigation et à l'évaporation dans le bras Sénégal est proportionnelle à l'ensemble des pertes indiquées dans l'étude de Manantali pour le tronçon Vending - Leboudou-Doué.

Le barrage de Diama avec une cote de retenue de +1,5 m IGN entraînera un relèvement du niveau d'eau. Ce relèvement sera de

- 147 cm au PK 244,
- 51 cm au PK 400 et de
- 2 cm au PK 489.

6.4.5.2 Tracé

Le fleuve Sénégal présente de fortes sinuosités sur ce tronçon de 245 km de long qui comprend un total de 56 courbes ayant un rayon inférieur à 1 000 m. La distance moyenne entre ces courbes est donc de l'ordre de 4,4 km. Trois courbes ont un rayon de 200 à 250 m (PK 309, PK 391 et PK 461) et 9 autres courbes un rayon d'environ 300 m. Le facteur de sinuosité de ce tronçon est de 1,7.

Les plans à l'échelle de 1/20 000 donnent de plus amples détails à ce sujet.

6.4.5.3 Largeur du lit mineur

Entre Leboudou-Doué et Vending, le lit mineur n'a que 80 à 300 m de largeur.

Les rétrécissements locaux du lit mineur ne permettant pas un croisement des convois M 3 sont caractéristiques pour ce tronçon. Si ces passages resserrés doivent être supprimés, la berge non escarpée du lit mineur devra être déblayée localement. Ces passages sont indiqués au tableau 6.4.5.3.

Tableau 6.4.5.3: Passages étroits

PK	R	B _{requ.} ¹⁾	sans Diama		Diama, RN = +1,50 m IGN	
			B _{disp.} ²⁾	ΔB ³⁾	B _{disp.} ²⁾	ΔB ³⁾
	m	m	m	m	m	m
338,0	400	75	-	-	55	20
355,0	400	75	-	-	65	10
380,0	1600	55	-	-	45	10
383,0	-	70	70	-	55	15
384,0	-	55	-	-	45	10
391,5	250	90	70	20	40	50
412,5	350	80	70	10	60	20
416,0	500	70	65	5	40	30
427,0	1100	55	40	15	30	25
440,2	800	60	25	35	25	35
455,0	350	80	60	20	60	20
473,8	1200	55	30	25	30	25
486,0	400	75	55	20	55	20

1) Largeur du fond du chenal navigable requise

2) Largeur disponible à 2,0 m au-dessous du niveau d'eau

3) Largeur en moins

En aval du PK 285, le lit est avec 150 à 200 m de largeur bien plus large qu'en amont. Des largeurs allant jusqu'à 300 m existent localement.

Du PK 285 au PK 489, le lit mineur a une largeur moyenne de 100 à 150 m. Des largeurs locales allant jusqu'à 200 m existent entre le PK 285 et le PK 417 et jusqu'à 300 m en amont du PK 417. Des mouillages insuffisants existent généralement dans ces élargissements. Les secteurs critiques du fleuve sont récapitulés au tableau 6.4.5.4 a).

Les berges du fleuve sont bien dessinées et elles sont situées, sur ce tronçon, 2 à 8 m au-dessus du niveau d'eau de référence.

6.4.5.4 Mouillages naturels

L'analyse des levés bathymétriques et des résultats des calculs sur le modèle mathématique montre qu'un mouillage d'au moins 2,0 m existe - pour le débit de référence et sans relèvement du niveau d'eau par le barrage de Diama - sur toute la largeur de chenal navigable du tronçon en aval allant du PK 244 au PK 330 (environ 3 km en aval de Mafou). Ce secteur est également caractérisé par de profonds affouillements dont la cote du fond est en-dessous de -10,0 m IGN. Abstraction faite des affouillements et des seuils, la cote du fond varie dans le talweg entre -5,0 et -10,0 m IGN.

L'utilisation de caboteurs pendant toute l'année jusqu'à Podor n'est pas possible sans relèvement du niveau d'eau à Diama à +1,5 m IGN étant donné que le mouillage n'est que d'env. 3,5 m au PK 254 et qu'il n'est même plus que de 2,5 m au PK 264 (1 km en aval de Podor). Si le barrage de Diama est réalisé, seul le seuil du PK 264 devra être aménagé pour obtenir le mouillage de 5,0 m sur la largeur requise.

Du PK 330 au PK 489, le fond est plus haut et sa cote varie entre 0,0 et -5,0 m IGN. Les affouillements ayant une cote de fond en-dessous de -10,0 m IGN sont rares. Des mouillages inférieurs à 2,0 m existent cependant ici à de nombreux endroits si le relèvement du niveau d'eau par le barrage de Diama n'est pas pris en considération. Pour une cote de retenue à Diama de +1,5 m IGN, le mouillage est généralement supérieur à 2 m jusqu'à Boghé. Le lit

mineur est cependant localement si étroit qu'un élargissement devra être effectué.

L'analyse des plans et des profils en long et en travers montre que les seuils sont dus aux facteurs suivants:

- élargissements locaux du lit mineur d'au moins 60 m,
- cours allongé du fleuve avec un lit mineur assez large dans lequel les basses eaux forment de nombreux méandres,
- bifurcations du fleuve et/ou
- fonds rocheux.

Le tableau 6.4.5.4 a) donne un aperçu des passages critiques de ce tronçon de fleuve.

Tableau 6.4.5.4 a) : Endroits critiques entre Leboudou-Doué et Vending (PK 244 à 489)

PK Localité	Largeur de ... à en m	Caractéristiques du tronçon					
		PK de ... à	Brève description ²⁾		Mouillage ¹⁾ en m (PK)	L en km	Abrévia- tion ²⁾
244 à 274 Podor	150 à 300		LM sinueux avec LE stable		-	30	-
		254	Mouillage trop faible pour les caboteurs	les	3,5/5,0(254)		S
		264	Mouillage trop faible pour les caboteurs	les	2,5/4,0(264)		S P
274 à 303 Donaye	120 à 200	-	LM très sinueux, mouillage suffisant pour la navigation fluviale		-	29	-
303 à 333 Lahel	100 à 180	-	LM parfois très sinueux, parfois allongé		-	30	-
		308,6 à 309,1 310 à 318	Courbe étroite, R~200 m LM allongé		-		
333 à 358 Wa-Wa	100 à 180	-	LM faiblement sinueux		-	25	-
		331 à 334	Elargissement local à 130 m		3,0/3,3(333,7)		S
		340 à 349	Elargissement local à 150 m		1,4/2,7(340) 1,6/2,8(348)		S S
358 à 388 Boghé	120 à 300		LM faiblement sinueux		-	30	-
		358,5 à 359,5	Surlargeur, B~170 m		1,3/2,6(359)		
		364 à 371	Surlargeur, B~150 m		1,4/2,5(365) 1,5/2,4(367)		S S
		374,5 à 376	Surlargeur, B~190 m		0,9/1,7(375)		S Pe
		377	Surlargeur, B~250 m		1,8/2,6(377)		S
		378,2 à 379	Surlargeur, B~220 m		1,2/2,0(379)		S
		379 à 381	LE étroit, déblaiement de la berge par le chenal		0,2/1,0(380)		Pe
		382,5 à 384,5	Bifurcation du fleuve, surlargeur jusqu'à B~400 m		1,2/1,9(382,5)		J Pe
388 à 418 Walaldé	80 à 200		Tracé du fleuve en partie allongé avec deux boucles étroites à Boki et Siouré		-	30	-
		390,0 à 392,0	Boucle étroite à Boki, R~200 m, $\varphi = 180^\circ$		1,4/2,0(390,5)		S
		408 à 410	Passage et surlargeur, B~160 m		0,5/0,9(409)		S P
		412 à 417	LE étroit, déblaiement de la berge et boucle étroite, R~350 m, $\varphi = 180^\circ$		0,5/0,9(412,5)		Pe
418 à 438 Kaskas	80 à 280		LM très allongé avec LE sinueux		-	20	-
		421 à 424	LE étroit, déblaiement de la berge		1,5/1,8(421)		Pe
		426 à 429	LM rectiligne avec surlargeurs		1,3/1,5(428,6)		S P Pe
		433 à 436	LE étroit		1,8/2,0(434)		S
438 à 472 Thioubalet	80 à 260		Lit du fleuve généralement très sinueux avec érosion des berges		-	34	-
		439 à 442,8	Surlargeur		0,9/1,1(440,2)		S P Pe
		443	Fort affouillement et érosion de la berge		10,5		C E
		444 à 449	LE étroit		1,4/1,5(448,5)		S P
		454,7	Fort érosion de la berge				E
		458 à 463	LM très étroit (95 m) dans la courbe étroite, déblaiement de la berge R~200 m, $\varphi = 130^\circ$		2,0(461)		Pe
		465 à 471	Passage difficile en aval de la courbe		1,4/1,5(468,3)		S P
472 à 489 Saldé	80 à 240		Lit sinueux avec de grandes surlargeurs		-	17	-
		472 à 478	Surlargeur du LM, LE étroit		0,3/0,3(474)		S P E Pe
		477 à 479	Erosion de la berge		-		E
		481 à 483	Surlargeur du LM		1,9/1,9(482)		S P E
		486 à 489	LE étroit, déblaiement de la berge		0,6/0,6(486)		S E Pe
		489,1	Embranchement du Doué		-		-
244 à 489	80 à 300	-	-		-	245	-

1) 3,2/4,7 = 1er chiffre sans et 2e chiffre avec le barrage de Diamma, retenue à +1,5 m IGN.

2) C = Creux
S = Seuil
P = Passage difficile
J = Ilot, bifurcation du fleuve
E = Erosion
Pe = Passage étroit.
LM = Lit mineur
LE = Lit d'étiage

Le tableau 6.4.5.4 b) indique les endroits où des travaux d'aménagement devront être exécutés en fonction des débits et mouillages demandés. Ce tableau est basé sur les profils en long du talweg, les profils en travers et les résultats du modèle mathématique. L'étude du profil en long n'est pas suffisante car celle-ci ne donne que les profondeurs du talweg.

Au tableau 6.4.5.4 b), les numéros des seuils choisis par Ivanov sont indiqués après la désignation des emplacements. Ce tableau montre que, en cas de non construction du barrage de Diama, des seuils supplémentaires devront être supprimés pour un mouillage demandé de 1,5 m mais que, par contre, quelques seuils cités par Ivanov ne gêneront pas la navigation pour ce mouillage.

Les seuils supplémentaires sont:

- Boghé PK 380,0
- Boki PK 391,5
- Siouré PK 412,5
- Abdallah PK 460.

Les seuils suivants ne nécessitent pas de travaux:

- Doungel PK 434,0 et
- Diâranguel PK 468,3.

Ces derniers seuils devront cependant être aménagés pour un mouillage de 2,0 m.

Il convient cependant de remarquer qu'une comparaison directe des seuils indiqués par Ivanov et des seuils susmentionnés n'est pas possible car

- l'Atlas Nautique n'indique que les seuils constatés par Ivanov à proximité immédiate de l'axe du fleuve sans que la position de cet axe soit exactement définie et que
- le Groupement LDE désigne par seuils les endroits où le mouillage requis n'existe pas sur toute la largeur du chenal navigable.

Les cas 1a et 1b du tableau 6.4.5.4 b) indiquent les seuils où les mouillages de 1,5 et 2,0 m ne sont pas atteints lorsque le niveau d'eau n'est pas relevé à Diama à +1,5 m IGN. Le tableau montre que 10 seuils devront être supprimés pour un mouillage demandé de 1,5 m et 19 seuils pour un mouillage de 2,0 m.

La retenue du barrage de Diama aura une double incidence positive sur l'aménagement pour la navigation car

- a) la hauteur de déblaiement est plus faible pour tous les seuils et
- b) le nombre de seuils à aménager est moins élevé.

Les incidences du barrage de Diama sont particulièrement évidentes par la comparaison des volumes de dragage (voir l'article 8).

Tableau 6.4.5.4 b): Travaux d'aménagement sur le tronçon Leboudou Doué - Vending

Emplacement des tra- vaux d'aménagement			Modèle ma- thématique Diam ²⁾ RN en m IGN	Cas de calcul									
				1a	1b	3	4	5	6	7	8	9	
				-	-	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	2,50	
N ^o d'or- dre	Nom du seuil (N ^o selon Ivanov)	PK de à	Débit selon Manantali	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 janv.	cas 7 janv.	PT 1 juin	cas 7 avril	
			Mouillage en m	1,5	2,0	1,5	2,0	2,5	Chenal effectué selon cas				
			PK criti- que ³⁾	Travaux à effectuer					Mouillage disponible en m				
1	Maïfou (4)	331 334	331,8	-	-	-	-	-	> 2,50	> 2,00	> 2,00	> 2,50	
2	Copé (5)	339 348	340,0	-	S	-	-	S	2,30	> 2,00	> 2,00	> 2,50	
3	N'Gorel (6)	364 370	365,0	S	S	-	-	S	2,13	> 2,00	> 2,00	> 2,50	
4	Sintiou Dangdè	374 376	375,0	-	S	-	S	S	2,02	1,89	1,97	> 2,50	
5	Boghé	373 382	380,0	S	S	S	S	S	2,02	1,55	1,96	> 2,50	
6	Démèt (7)	382 385	382,5	S	S	S	S	S	2,05	1,55	1,97	> 2,50	
7	Boki	388 392	391,5	S	S	S	S	S	2,06	1,56	1,96	> 2,50	
8	Woki	408 410	409,0	-	S	-	-	S	2,10	2,00	1,97	> 2,50	
9	Siouré	412 418	412,5	S	S	S	S	S	2,08	1,58	1,93	> 2,50	
10	Toundé Killa	418 424	421,0	-	S	-	S	S	2,09	1,79	1,93	> 2,50	
11	Kaskas (8)	426 429	428,6	S	S	S	S	S	2,09	1,60	1,91	2,50	
12	Doungel (9)	433 439	434,0	-	S	-	S	S	2,11	1,80	1,89	2,46	
13	Dioudé Diabé (10)	439 443	441,3	S, R, O	S, R, O	S, R, O	S, R, O	S, R, O	2,11	1,64	1,88	2,34	
14	Bito	444 449	448,5	-	S, (R)	-	S, (R)	S, (R)	2,11	1,70	1,87	2,30	
15	Thioubalel	451 456	452,0	-	S	-	S	S	2,12	> 2,00	1,85	2,26	
16	Abdallah (11)	458 463	461,0	-	S	-	-	S	2,13	1,67	1,84	2,22	
17	Diâranguel (12)	465 471	468,3	S	S	-	S	S	2,13	1,67	1,84	2,19	
18	Taitaba (13)	472 480	474,0	S	S	S	S	S	2,14	1,67	1,83	2,12	
19	Saldé	480 483	482,0	-	S	-	S	S	2,14	> 2,00	1,82	2,08	
20	Vending (14)	484 489	486,0	S	S	S	S	S	2,14	1,67	1,81	2,06	
Nombre de seuils à aménager				10	19	8	15	19	-	-	-	-	

1) S = Dragage de sable

R = Dérochement

O = Ouvrages de correction

2) Cote de retenue à Diam

3) Emplacement critique selon cas 5

6.4.5.5 Seuils difficiles et passages critiques

Le seuil de Dioudé Diabé (PK 439 à PK 443) est le seuil le plus important entre Leboudou-Doué et Vending. Celui-ci est le premier passage rocheux rencontré en remontant le fleuve.

Ce rocher est un calcaire cristallin jaunâtre à blanchâtre dont la surface est fissurée. Des sondages ont montré que la cote de l'horizon rocheux dans le fond du fleuve varie entre $\pm 0,0$ et $-2,3$ m IGN (voir à ce sujet la Mission B.2).

Le seuil de Dioudé Diabé comprend cinq passages consécutifs. Une comparaison des photos aériennes faites à environ dix ans d'intervalle montre que le lit d'étiage a modifié sa position. Sur la rive droite, un banc de sable s'est formé dans le secteur amont, ayant entraîné la formation d'un autre passage.

Le seuil de Diâranguel (PK 467 à PK 470) peut être également considéré comme instable. Le banc de sable sur la rive gauche avant la localité de Diâranguel s'est agrandi depuis 1969.

Les courbes étroites existant sur ce tronçon à

- Leboudou, PK 309,
- Boki, PK 391,5,
- Siouré, PK 413,
- Abdallah, PK 461,5 et
- Diâranguel, PK 468,5

diminuent la visibilité et ne permettent pas toujours le croisement de deux convois M 3.

Les autres passages critiques sont :

- la bifurcation du fleuve à Boghé et
- l'affouillement et l'éboulement de la berge convexe à Diamel Vidime (PK 454,7), qui en résulte apparemment.

6.4.5.6 Travaux d'aménagement à exécuter

a) Travaux de dragage et de dérochement

Le chenal navigable requis doit être réalisé dans ce tronçon au moyen de dragages. Au cours de ces travaux, des rochers devront être également supprimés.

Des dragages d'entretien seront dans ce cas nécessaires car les bancs de sable changent leur position notamment dans les secteurs où le lit mineur est allongé et assez large. Ces derniers travaux ont été pris en considération dans la Mission A.1.14.

Les matériaux dragués peuvent être utilisés pour le remblayage des affouillements situés à proximité si la surface du remblaiement de l'affouillement est protégée par des matériaux assez grossiers. Les matériaux dragués doivent être sinon refoulés en dehors du lit mineur. Les matériaux rocheux dragués à Dioudé Diabé et éventuellement à Bito peuvent servir à la protection du fond des remblayages de creux.

b) Ouvrages de correction

Entre le PK 454 et le PK 456 (Diamel Vidime), un grand affouillement existe en aval de la courbe, sur la rive gauche. La rive concave est fortement dentelée.

Cette irrégularité dans le tracé de la rive pourrait être supprimée en construisant sur la rive droite un panneau de surface entre le PK 454,8 et le PK 455,4. Sur la rive gauche, l'affouillement devra être comblé et le remblayage devra être protégé. L'exécution de ces travaux n'est pas actuellement obligatoire et elle ne sera donc mise au concours que facultativement.

Le dédoublement du fleuve près de Boghé (PK 382 à PK 385) pourrait être supprimé dans le cadre des travaux à mettre au concours, si les moyens financiers nécessaires peuvent être mis à disposition. Sinon, ces travaux devraient être exécutés ultérieurement par la Direction de la Voie Navigable. Etant donné que le chenal sera déplacé un jour à cet endroit, la rive concave du chenal existant actuellement ne devrait pas être protégée.

c) Augmentation du débit dans le bras Sénégal

Afin de pouvoir réduire les travaux d'aménagement sur ce tronçon et de réduire ainsi les investissements et les frais d'entretien, l'incidence de l'augmentation du débit dans le bras Sénégal sur le mouillage sera étudiée.

Le tableau 6.4.5.6 fait ressortir les augmentations de la profondeur à prendre en compte dans le cas où le débit naturel du bras Sénégal, d'env. 56 % du débit total, est augmenté.

Tableau 6.4.5.6: Débit dans le bras Sénégal

		Débit dans le bras Sénégal en % et en m ³ /s						
Répartition		Etat naturel ¹⁾ 56%=114m ³ /s	64% = 130 m ³ /s		70% = 143 m ³ /s		80% = 163 m ³ /s	
Emplacement	PK	H en m IGN	H en m IGN	ΔH ²⁾ en m	H en m IGN	ΔH ²⁾ en m	H en m IGN	ΔH ²⁾ en m
Podor	266	0,06	Presque constant					
Boghé	382	1,16	1,26	0,10	1,41	0,25	1,61	0,45
Dioudé Diabé	440	2,48	2,70	0,22	2,86	0,38	3,11	0,63
Saldé	481	3,75	3,93	0,18	4,10	0,35	4,40	0,65

1) Etat naturel = cas 1 du modèle mathématique.

2) ΔH par rapport à l'état naturel

Afin d'augmenter le débit dans le bras Sénégal, l'embranchement du Doué doit être resserré par des ouvrages de correction. Etant donné que les courants modifiés influencent la circulation des bateaux entre le Sénégal et le Doué et que les conditions particulières ne sont pas assez exactement prises en considération dans le modèle mathématique, ce secteur a été étudié dans le modèle réduit.

Les essais sur modèles réduits ont donné ce qui suit:

- (1) Afin de porter le débit dans le bras Sénégal de 56 % à 64 %, l'embranchement du Doué doit être fortement resserré, de façon qu'une circulation entre le bras Doué et le fleuve Sénégal ne puisse être possible. En plus des courbes très prononcées à l'embranchement, la pente dans le bras Doué serait portée de actuellement 0,1 o/oo à 0,4 o/oo.

- (2) La profondeur à l'embranchement sera augmentée de 6 à 9 cm par l'augmentation de 56 % à 64 % du débit dans le bras Sénégal.
- (3) Les irrégularités, conditionnées par la méthode utilisée dans le modèle mathématique, de la ligne d'eau du bras du Doué ont été éclaircies par le modèle hydraulique.

Après examen des avantages et désavantages, découlant du rétrécissement de l'embranchement du Doué et de l'augmentation de la profondeur dans le bras Sénégal, il est recommandé de renoncer à des ouvrages de correction. Les désavantages qui apparaîtraient pour la navigation dans le secteur de l'embranchement du Doué seraient plus importants que les avantages de l'approfondissement atteint du chenal dans le bras Sénégal.

6.4.5.7 Travaux d'aménagement à exécuter ultérieurement

Les travaux suivants pourront être réalisés ultérieurement par la Direction de la Voie Navigable:

- Réduction des surlargeurs locales en construisant des épis et des ouvrages longitudinaux en vue de diminuer les dragages d'entretien. Ceci s'applique également aux tronçons où le lit mineur est allongé et où le lit au débit d'étiage présente des méandres.
- Protection des berges dans les secteurs critiques.
- Adoucissement des courbes étroites mentionnées à l'art. 6.4.5.5. Dans les courbes près de Boki et de Siouré, des percements peuvent être effectués et ceux-ci réduiraient la longueur du chenal navigable d'au moins 3 km à chacun de ces endroits.

- Suppression de la bifurcation du fleuve près de Boghé et protection de la berge à Diamel-Vidime dans la mesure où ces travaux n'ont pas également été effectués dans le cadre des travaux d'aménagement mis au concours.

6.4.6 Vending (PK 489) à Matam (PK 637)

6.4.6.1 Généralités

La retenue de +1,5 m IGN du barrage de Diama n'a pratiquement plus d'influence sur le niveau d'eau dans ce tronçon. Le relèvement de 2 cm au PK 489 calculé dans le modèle mathématique est sans influence pour les travaux d'aménagement. Pour une cote de retenue de +2,5 m IGN, le niveau d'eau au PK 489 sera relevé d'environ 6 cm. La retenue ne se fait plus sentir aux environs du PK 540. Ce relèvement est également peu important pour les travaux d'aménagement et il peut être négligé.

6.4.6.2 Tracé

Le fleuve Sénégal a sur ce tronçon de 148 km de longueur un cours essentiellement allongé. Des sinuosités importantes existent à :

- Dâwalel PK 503 à 512, L = 9 km,
- Kaédi PK 537 à 562, L = 25 km,
- Sadél PK 589 à 598, L = 9 km,
- Koundél PK 610 à 616, L = 6 km,
- Matam PK 626 à 636, L = 10 km.

Les rayons des courbes sont cependant beaucoup plus grands que dans le bras Sénégal en aval de Vending. 17 courbes ont un rayon inférieur à 1 000 m dont une a un rayon d'environ 300 m et quatre un rayon variant entre 300 et 500 m. Etant donné que le lit mineur est très large et que son tracé est allongé, le talweg présente de plus fortes sinuosités que le lit mineur.

6.4.6.3 Largeur du lit mineur

Le lit mineur a dans ce tronçon une largeur de 200 à 500 m. Des rétrécissements jusqu'à 150 m et des élargissements jusqu'à 550 m peuvent être constatés localement.

Les berges du fleuve sont situées à 5 à 8 m, et localement même à 10 m, au-dessus du niveau d'eau de référence et elles sont bien dessinées.

6.4.6.4 Mouillages existants

Les mouillages dépendent, également dans ce tronçon, fortement de la largeur du lit mineur. Pour des largeurs comprises entre 300 et 500 m, le mouillage est, pour le débit de référence, souvent inférieur à 2 m. Des affouillements d'environ 7 m à 20 m de profondeur existent dans les passages resserrés de 100 à 150 m de largeur. Les bifurcations du fleuve et la tendance de celui-ci à allonger son tracé afin de diminuer sa pente sont typiques pour ce tronçon. Ceci entraîne des éboulements de la berge concave, des élargissements du lit mineur et par conséquent

la diminution du mouillage. De plus, des bras secondaires se forment lors des crues, comme par exemple à N'Guidjilone, Sadél et Koundél.

Les caractéristiques de ce tronçon de fleuve sont récapitulés au tableau 6.4.6.4 a).

Tableau 6.4.6.4 a): Endroits critiques entre Vending et Matam (PK 439 à PK 637)

PK Localité	Largeur de ... à en m	PK de ... à	Caractéristiques du tronçon			
			Brève description ¹⁾	Mouillage en m (PK)	L en km	1) Abrévia- tion
489 à 502 Saldé	150-300	-	LM allongé avec LE faiblement sinueux	>2,0	13	-
502 à 532 Varafounde	150-350		LM faiblement sinueux avec des sec- teurs rectilignes dans lesquels le LE fait des méandres		30	-
		502 à 506	Secteur rectiligne avec grande lar- geur (300 m), LE sinueux	1,7 (502,8) 1,2 (503,2)		S P
		506 à 510	Secteur dans un coude d'une profon- deur suffisante	-		-
		512,1	Fort affouillement de la berge et du fond en aval d'un rétrécisse- ment à 100 m	19,5		C
		513 à 516,5	LM rectiligne, étroit (B ≤ 200 m)	-		-
		516,5 à 518	Banc de sable en aval d'un marigot (B = 350 m)	>3,0		-
		519 à 521	Courbe (R = 700 m), érosion de la berge	-		E
		522 à 523	Courbe avec érosion de la berge	-		E
		523 à 532	LM rectiligne et large avec des bancs de sable et érosion de la berge	>2,0		S E
532 à 568 Kaédi	150-550		LM très sinueux avec des surlar- geurs dans les courbes dues aux érosions des berges et avec des passages difficiles		36	-
		532,5 à 533,5	Passages difficiles	1,7 (533,2)		S P
		537 à 541	Surlargeur et érosion de la berge	1,6 (537)		S P E
		542 à 547	Boucle avec surlargeur et érosion de la berge	1,4 (545,8)		S P E
		554 à 557	Bifurcation du fleuve, passages au 556,5	1,8 (556,5)		S P J
		557 à 560	Surlargeur, LE sinueux	1,9 (559)		S J
		560,6	Affouillement dû au rétrécissement à 150 m	>15		C
		564 à 568	LM allongé d'une largeur jusqu'à 350 m avec LE sinueux	2,0		-
568 à 588 Djowol	150-550		LM allongé avec LE sinueux, surlar- geurs dans les courbes en raison de l'érosion des berges et pas- sages difficiles dans les sec- teurs rectilignes		20	-
		571 à 574,5	Surlargeur du LM sinueux avec éro- sion de la berge; le LE fait des méandres dans le coude, apparem- ment en raison du fond rocheux	-		E
		576	Affouillement profond dû au ré- trécissement à 150 m	10,5		C
		576,3 à 578	Surlargeur du LM sinueux en raison de l'érosion de la berge	2,0 (578)		S P E
		579	Affouillement profond en raison du rétrécissement à 150 m	10,5		C
		583 à 587	Surlargeur du LM et bifurcations du fleuve avec des passages difficiles	1,6-2,0 (584,5 à 586,3)		S P J

¹⁾ Voir page suivante.

Suite du tableau 6.4.6.4 a)

PK Localité	Largeur de ... à en m	PK de ... à	Caractéristiques du tronçon			
			Brève description ¹⁾	Mouillage en m (PK)	L en km	Abré- ¹⁾ via- tion
588 à 616 Sadél	150-550		LM allongé à très sinueux		28	-
		589,5 à 590,5	Forte érosion de la berge dans la courbe	-		E
		593,5	Affouillement dû au rétrécissement à 170 m	7,0		C
		594 à 597	Bifurcation du fleuve	-		J
		595	Affouillement dû au rétrécissement du bras principal à 100 m	10,0		C
		599,3	Affouillement dû au rétrécissement à 160 m	10,0		C
		603 à 605	Bifurcation du fleuve	-		J
		605 à 608	Erosion de la berge dans le coude	-		E
		610	Affouillement dû au rétrécissement à 130 m	10,0		C
		612,7	Affouillement dû au rétrécissement à 130 m	8,0		C
		613 à 616	Bifurcations du fleuve et érosion de la berge dans le coude (B ~ 550 m)	2,0 (614)		-
616 à 637 Matam	150-500		LM allongé à sinueux		21	
		616 à 618	Erosion de la berge dans le coude (B ~ 500 m)			E
		619 à 628	LM très rectiligne, d'env. 250 m de largeur, LE stable	3,5-5,0		-
		628 à 630	Coude prononcé sans érosion (berge rocheuse)	-		-
		630,2	Affouillement dû au rétrécissement à 180 m	-		C
		631 à 633	Grande largeur en raison de l'érosion de la berge avec bifurcation du fleuve	-		J E
		634,2 à 635	Affouillement dû au rétrécissement à 150 m sans érosion de la berge	-		C
		635,5 à 638	Grande largeur en raison de l'érosion de la berge	>2,0		E
489 à 637	150-550	-	-	-	148	-

¹⁾ C = Creux

S = Seuil

P = Passage difficile

J = Ilot, bifurcation du fleuve

E = Erosion.

LM = Lit mineur

LE = Lit d'étiage

Les mouillages pour le débit de référence sont plus favorables dans ce tronçon que dans le bras Sénégal en aval de Vending. Le mouillage n'est inférieur à 2 m qu'à certains endroits du talweg. A ce sujet, il convient notamment de mentionner les secteurs:

- Dâwalel, PK 502 à 503,
- en amont de Kerr, PK 533,
- N'Guidjilone, PK 584 à 586 et
- Koundél, PK 613 à 617.

Le tableau 6.4.6.4 b) donne les seuils à aménager en fonction du débit et du mouillage du chenal navigable. La comparaison de ces seuils avec ceux indiqués par Ivanov montre que, pour un chenal navigable de 2 m de mouillage, le seuil de

- PK 490, Vending II

devra être aménagé en supplément.

Des dragages ne sont par contre pas nécessaires pour un mouillage d'aménagement de 2,0 m pour les seuils suivants:

- PK 545,8, Orenata,
- PK 564, Guiraye,
- PK 571,2, Djowol,
- PK 615, Koundél,
- PK 633, Diammél et
- PK 636, Matam.

Pour un mouillage de 1,5 m, des travaux d'aménagement ne devront être exécutés qu'à N'Guidjilone. Pour un chenal de 2,5 m de profondeur, des travaux d'aménagement devront par contre être effectués à 16 endroits.

Tableau 6.4.6.4 b): Travaux d'aménagement sur le tronçon Vending - Matam

Emplacement des travaux d'aménagement			Modèle mathématique	Cas de calcul								
				1a	1b	3	4	5	6	7	8	9
			Diamas ²⁾ RN en m IGN			-	-	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
N° d'ordre	Nom du seuil (N° selon Ivanov)	PK de à	Débit selon Manantali	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 janv.	cas 7 janv.	PT 1 juin	cas 7 avril
			Mouillage en m	1,5	2,0	1,5	2,0	2,5	Chenal effectué selon cas			
			PK critique ³⁾	Travaux à effectuer ¹⁾					Mouillage disponible en m			
21	Vending II	490 492	490,0	-	S	-	S	S	2,15	2,00	1,81	2,06
22	M'Bagne (15)	495 502	496+498,2 (v. profil)	-	S	-	S	S	2,17	>2,00	1,80	2,05
23	Dâwalel (16)	502 505	502,8	-	S, (R)	-	S, (R)	S, (R)	2,19	1,96	1,77	2,02
24	Daébe	528 530	529,0	↑ Aucune influence de Diamas	↑ Aucune influence de Diamas	-	-	S	>2,50	>2,00	2,00	2,30
25	Kerr (17)	532 534	533,2			-	S, (R)	S, (R)	2,23	1,74	1,70	2,00
26	Kaédi	535 543	537,0			-	-	S	2,21	>2,00	1,70	2,00
27	Orenata (18)	545 549	545,8			-	-	S	2,30	>2,00	1,77	↑ Aucune influence de Diamas
28	Gâwol (19)	556 560	556,5			-	S	S	2,22	1,76	1,69	
29	Guiraye (20)	562 565	564,0			-	-	S	2,46	>2,00	1,95	
30	Djowol (21)	568 574	571,2			-	-	-	>2,50	>2,00	>2,00	
31	Dôndou	577 579	578,0			-	-	S	>2,50	>2,00	>2,00	
32	N'Guidjilone (22)	584 589	585,7			0	S, 0	S, 0	2,24	1,95	1,69	
33	Oudourou	603 606	604,0	↓ Aucune influence de Diamas	↓ Aucune influence de Diamas	-	-	S	2,33	>2,00	1,70	↓ Aucune influence de Diamas
34	Koundél (23)	613 617	615,0			0	0	S, 0	2,29	>2,00	1,69	
35	Diammél (24)	632 634	633,0			-	-	-	>2,50	>2,00	>2,00	
36	Matam (25)	635 637	636,0			-	-	-	>2,50	>2,00	>2,00	
Nombre de seuils à aménager				-	-	2	7	13	-	-	-	-

- 1) S = Dragage de sable
R = Dérochement
O = Ouvrages de correction

2) Cote de retenue à Diamas, la retenue à 1,5 m IGN n'a pas d'influence sur la hauteur de la ligne d'eau

3) Emplacement critique selon cas 5

6.4.6.5 Seuils difficiles et passages critiques

Un des seuils les plus difficiles de ce tronçon est celui de N'Guidjilone (PK 584 à 589). Le fleuve présente ici des bifurcations et il est très large.

Des mouillages particulièrement faibles existent également à :

Vending II

M'Bagne

Dâwalel

Kerr et

Gâwol.

Une comparaison des photos aériennes des années 1969 et 1977 montre d'autre part que les seuils de

Dâwalel

Gâwol

Guiraye

Koundel et

Matam

se sont déplacés.

Les bifurcations du fleuve et les rives concaves constituent des passages critiques sur ce tronçon et apparaissent souvent en liaison avec des seuils. Les rives concaves sont exposées à une forte érosion en raison de la pente relativement forte sur ce tronçon.

Les rayons des courbes ne gênent par contre pratiquement pas la navigation.

6.4.6.6 Travaux d'aménagement à exécutera) Travaux de dragage et de dérochement

Sur ce tronçon, la réalisation d'un chenal navigable de 2 m de profondeur nécessite des travaux de dragage peu importants. Des travaux de dérochement devront être effectués à Dâwalel et Kerr. Etant donné que la position des bancs de sable n'est pas stable, des travaux d'entretien seront également nécessaires sur ce tronçon. L'exposé de l'art. 6.4.5.6 a) s'applique d'autre part à ce tronçon.

b) Ouvrages de correction

Sur ce tronçon, le fleuve Sénégal tend à réduire sa pente en allongeant son cours. Seuls des ouvrages de correction permettront de parer de façon durable à cette tendance et ceux-ci auront pour but:

- d'empêcher la formation de méandres dans le lit mineur et
- de réduire les surlargeurs existantes.

Aux endroits particulièrement menacés, il est donc nécessaire:

- de protéger les rives concaves et
- de supprimer les bifurcations du fleuve.

Les travaux suivants devront être exécutés dans le cadre des travaux à mettre au concours:

- (1) Suppression de la bifurcation du fleuve à N'Guid-jilone par la construction d'épis et de digues entre PK 583 et PK 587. Ceci entraînera la protection de la berge concave, le rétrécissement du fleuve et l'augmentation du mouillage.
- (2) Protection de la rive concave et suppression de la bifurcation du fleuve qui se forme à Koundél au PK 614. Si cette protection n'est pas effectuée, le bras secondaire pourra s'approfondir au cours des années.

L'exécution des travaux suivants est souhaitable:

- (3) La protection de la berge concave près de Kaédi, du PK 541 au PK 546, avec raccordement au barrage existant, afin de protéger ainsi contre l'érosion également la digue de raccordement existante du barrage.

c) Rectification des courbes

La rectification des courbes doit être évitée sur ce tronçon car celle-ci entraînerait une augmentation de la pente du fleuve et une aggravation de l'érosion des berges concaves.

6.4.6.7 Travaux d'aménagement à exécuter ultérieurement

Les travaux suivants pourraient être exécutés par la Direction de la Voie Navigable:

- (1) La protection de la berge indiquée au point (3) de l'article 6.4.6.6 b), si celle-ci n'est pas exécutée immédiatement ou sur toute sa longueur.

- (2) La protection des berges concaves à Gâwol (PK 554 à PK 557 et à Guiraye (PK 560 à PK 562)).
- (3) Le rétrécissement du profil en travers et la stabilisation du tracé du chenal navigable à Guiraye (PK 562 à PK 566).
- (4) La protection de la berge concave à Djowol et éventuellement le rétrécissement des profils en travers par la construction d'épis. (PK 570,8 et PK 574,5).
- (5) La protection de la berge concave à Dôndou (PK 576 à 578) et éventuellement le rétrécissement des profils en travers par des épis.
- (6) Le rétrécissement des profils en travers et la stabilisation du tracé du chenal navigable près de Dâwalel (PK 501,5 à 504,5) au moyen d'épis.
- (7) Le rétrécissement des profils en travers et la stabilisation du tracé du chenal navigable près de Kerr (PK 532,5 à 535,5).

6.4.7 Matam (PK 637) à Bakel (PK 816)6.4.7.1 Généralités

La partie inférieure de ce tronçon est située dans la "Vallée" alluviale et la partie supérieure, entre Diawara et Bakel, dans le paléozoïque du "Haut-Bassin". Les rochers barrent en partie le fleuve (Diawara) et ils atteignent parfois le fond du fleuve. Du quartzite, du micaschiste et des conglomérats métamorphiques ont été rencontrés.

6.4.7.2 Tracé

Ce tronçon de 179 km de long est caractérisé par de longs secteurs rectilignes de 10 à 20 km. Le lit d'étiage présente de nombreux méandres dans ces secteurs qui sont généralement très larges. Il en résulte des passages présentant partiellement de fortes courbes et ayant un faible mouillage. Les rayons du lit mineur sont relativement grands. 12 courbes ont un rayon inférieur à 1 000 m, mais aucune courbe n'a un rayon inférieur à 300 m. Des largeurs d'au moins 150 m dans les coudes suffisent pleinement à la navigation.

6.4.7.3 Largeur du lit mineur

Le lit mineur a une largeur de 150 à 700 m. De faibles largeurs se rencontrent dans les courbes étroites ayant des berges stables. Dans les coudes n'ayant pas de berges stables, comme par exemple au PK 645, un large lit mineur avec des bancs de sable à la rive convexe s'est formé en raison de l'érosion de la berge concave.

Les berges sont situées 4 à 12 m au-dessus du niveau d'eau de référence. A Bakel, les berges ont jusqu'à 20 m de hauteur.

6.4.7.4 Mouillages existants

Les mouillages dépendent de la largeur du lit mineur et du tracé. Si la largeur est inférieure à 450 m, le mouillage est généralement supérieur à 2,5 m. Ce mouillage n'est généralement pas atteint pour de plus grandes largeurs et notamment lorsque le lit d'étiage passe d'une berge à l'autre, c'est-à-dire dans les passages.

Les caractéristiques de ce tronçon sont récapitulées au tableau 6.4.7.4 a).

Tableau 6.4.7.4 a): Endroits critiques entre Matam et Bakel (PK 637 à PK 816)

PK Localité	Largeur de ... à en m	PK de ... à	Caractéristiques du tronçon			
			Brève description ¹⁾	Mouillage en m (PK)	L en km	Abrévia- tion ¹⁾
637 à 669 Matam et Thiépang	150-550	-	LM essentiellement rectiligne et large avec LE sinueux	-	32	-
		642 à 643	LM étroit, B ~ 200 m	3,5		C
		644 à 645,5	Grande largeur et érosion de la berge dans la courbe	~2,0(645)		S E
		646 à 660	Grand LM et LE sinueux avec des surlargeurs, L = 12 km	~2,0(652à655) ~1,7(656à658)		S P
		660,4 et 662,5	Affouillements dans les courbes dus au rétrécissement à 150 m IGN, pas d'érosion de la berge	17,7		C
		663 à 667	Grande largeur, B ~ 550 m, érosion de la berge, passages difficiles	1,3(665à667)		S P E
		665 à 667	Passage difficile	2,0(665,4)		S
669 à 695 Ornolde	150-500	-	LM allongé et large avec LE sinueux	-	26	-
		670	Affouillement dû au rétrécissement à 200 m avec faible érosion de la berge	8,0		C
		672 à 687	LM allongé avec LE sinueux, L = 15 km	-		-
		676,5 à 678,5	Passage difficile	1,6(777,2)		S P
		687 à 689	Affouillement dans la courbe étroite, B ~ 150 m, érosion de la berge concave	12,0		C
695 à 720 Ganguel- Soulé	150-300	-	LM allongé avec LE sinueux sur une longueur de 19 km	-	25	-
		697 à 700,5	Courbe très prononcée avec forte érosion de la berge, B = 800 m	-		E
		700,6 à 701,5	Passage difficile	2,0(701)		S P
		702 à 703,6	Affouillement, B = 250 à 300 m	2,0		C
		703,6 à 704,5	Passage difficile	-		S P
		703 à 709,4	Affouillement, B = 150 à 200 m	-		C
		711 à 715	Bifurcation du fleuve et faible érosion de la berge	-		J E
720 à 758 Waoudé	150-700	-	LM sinueux et large avec de grands rayons, forte érosion des berges et bancs de sable sur la rive convexe	-	38	-
		721 à 722	Affouillement dû au rétrécissement à 200 m	9,0		C
		728 à 732	Elargissement à 700 m, forte érosion de la berge	~1,8(731)		S P E
		737,3 à 739,2	Erosion de la berge, B ~ 400 m	~2,0(738)		E
		747 à 747,6	Passage difficile	~1,4(747)		S P
		754,5 à 757,5	Surlargeur, B = 700 m, érosion de la berge	-		E
		756,5 à 757,5	Passage difficile	~2,0(757)		S
758 à 781 Dembankane	150-600	-	LM allongé et large sur une longueur de 13 km avec LE sinueux	-	23	-
		760 à 762	Passage difficile	~2,0(761)		S P
		765 à 767	Passage difficile	~2,0(765,8)		S P
		769,5 à 770,5	Passage	~2,5(769,8)		S
		773	Affouillement de la berge en aval d'une courbe étroite, R = 500, B = 150 à 300 m	13,0		C E
781 à 801 Diawara	180-700	779 à 780	Passage	~2,5(779,2)	20	S P
		-	Tracé presque rectiligne du LM, LE très sinueux, surlargeurs dans les bifurcations du fleuve, tronçon très difficile	-		-
		785,5 à 787	Passage difficile	<2,5(787)		S P
		787 à 792,5	Surlargeur, bifurcations du fleuve, îlots	-		S J
		793	Presqu'île et îlot rocheux qui barrent le talweg	-		J
		794,5 à 796	Ilots et grands champs de dunes	~2,0(797)		J
801 à 816 Bakel	150-700	799,5 à 801	Affouillement dû au rétrécissement, B = 180 m	14,3	15	C
		801 à 816	LM rectiligne, très grande largeur, LE sinueux	-		-
		801 à 806	Passages difficiles	<2,5(802)		S P
		803 à 804	Grandes largeurs	-		S
		810 à 811	Passages difficiles	~2,0(811)		S P
		812,5 à 814,2	Bifurcations du fleuve (2 îlots)	-		J
		814,5 à 816,5	Passage difficile	~2,0(815)		S P
816 à 836	150-800	816	Affouillement dû au rétrécissement, B = 150 m	20,0	179	C
		-	-	-		-

¹⁾ Voir la note au bas de la page 6 - 44 (tableau 6.4.6.4 a)).

Par suite de la grande largeur, du tracé parfois très rectiligne du lit mineur et du lit d'étiage très sinueux, ce tronçon présente plus de seuils que le tronçon Vending - Matam. Des mouillages de l'ordre de 2,0 m ou inférieur à 2,0 m existent à:

- Thiénping, PK 655 à 659,
- Odobéré, PK 665 à 667,
- N'Gano, PK 675 à 679,
- Goumal, PK 718 à 720,
- Waoudé, PK 728 à 732,
- Guelle, PK 737 à 739,
- Gourel Dara, PK 746 à 748,
- Moudéri, PK 786 à 790,
- Diawara, PK 793 à 799,
- Guilde, PK 801 à 806,
- Bakel, PK 814 à 816.

Le tableau 6.4.7.4 b) indique les seuils en fonction du débit et du mouillage à réaliser du chenal navigable.

La comparaison de cette liste avec celle dressé par Ivanov montre que seul le seuil de Tuabo (PK 810 à 813) devra être aménagé en plus uniquement pour une profondeur de 2,5 m. Des dragages ne sont, par contre, pas nécessaires à Barmatia.

Six seuils devront être aménagés pour un mouillage utilisable de 1,5 m et onze seuils pour un mouillage de 2,0 m.

Tableau 6.4.7.4 b): Travaux d'aménagement sur le tronçon Matar - Bakel

Emplacement des travaux d'aménagement			Modèle mathématique	Cas de calcul					
				3	4	5	6	7	8
			Diama ²⁾ RN en m IGN	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
N° d'ordre	Nom du seuil (N° selon Ivanov)	PK de à	Débit selon Manantali	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 janv.	cas 7 janv.	PT 1 juin
			Mouillage en m	1,5	2,0	2,5	Chenal effectué selon cas		
			PK critique 3)	Travaux à effectuer ¹⁾			Mouillage disponible en m		
							4	3	4
37	Diandjoli (26)	644 646	645,0	-	-	S	> 2,50	> 2,00	> 2,00
38	El Hadj Oumar (27)	651 655	652,0	-	-	S	2,41	> 2,00	1,83
39	Thiépning (28)	655 659	656,3	-	S	S	2,24	1,86	1,70
40	Odobéré (29)	665 667	665,4	S	S	S	2,24	1,74	1,70
41	N'Gano (30)	675 678	677,2	-	S	S	2,24	1,85	1,69
42	Barmatia (31)	681 683	681,8	-	-	-	> 2,50	> 2,00	> 2,00
43	Gouriki (32)	700 704	701,0	-	-	S	2,39	> 2,00	1,74
44	Goumal (33)	718 720	719,5	S,0	S,0	S,0	2,26	1,76	1,64
45	Waoundé (34)	728 732	731,0	S	S	S	2,28	1,77	1,63
46	Guelle (35)	737 739	738,0	-	S	S	2,28	1,77	1,62
47	Gourel Dara (36)	746 748	747,0	S	S	S	2,28	1,77	1,63
48	Adabéré (37)	760 763	-	-	-	S	> 2,50	> 2,00	1,84
49	Yerma (38)	765 767	765,8	-	-	S	2,38	> 2,00	1,74
50	Moudéri (39)	786 790	787,0	-	S	S	2,27	> 2,00	1,63
51	Diawara (40)	793 799	(793,3) 798,8	- , R	S , R	S , R	2,23	> 2,00	1,68
52	Guilde (41)	801 806	802,0	-	S , (R)	S , (R)	2,22	> 2,00	1,68
53	Tuabo	810 813	811,0	-	-	S	2,34	> 2,00	1,79
54	Bakel (42)	814 816	815,2	S	S	S	2,23	1,73	1,65
Nombre de seuils à aménager				6	11	17	-	-	-

1) S = Dragage de sable
R = Dérochement
O = Ouvrage de correction

2) La retenue à Diama n'a pas d'influence sur la hauteur de la ligne d'eau

3) Emplacement critique selon cas 5

6.4.7.5 Seuils difficiles et passages critiques

Le passage le plus difficile de ce tronçon se trouve à Diawara. Il est dû à une presqu'île et à un îlot rocheux. Le talweg passe actuellement entre la presqu'île et l'îlot en formant une courbe très prononcée. Les rochers représentent un danger pour la navigation et doivent donc être supprimés ou être contournés par l'aménagement d'une nouvelle voie navigable.

Le seuil de Goumal, à cause de la faible profondeur naturelle et le seuil de Bakel, à cause de la bifurcation du fleuve, constituent d'autres seuils difficiles.

6.4.7.6 Travaux d'aménagement à exécuter

a) Travaux de dragage

Afin d'obtenir un mouillage de 2,0 m, les seuils critiques devront être approfondis par des dragages indiqués aux tableaux 6.4.7.4 b). Etant donné que le lit d'étiage présente des méandres très prononcés sur ce tronçon, des dragages d'entretien assez importants seront nécessaires. Afin de stabiliser la position du chenal navigable et de réduire ainsi les dragages d'entretien, des ouvrages de correction devraient être réalisés à la longue par la Direction de la Voie Navigable. Pour de plus amples renseignements à ce sujet voir l'article 6.4.7.7.

b) Ouvrages de correction

Dans le cadre des travaux d'aménagement à mettre au concours, des ouvrages de correction et/ou des travaux de dérochement seront nécessaires à :

- Diawara,
- Goumal et
- éventuellement à Bakel.

Diawara

Afin de supprimer le point dangereux à Diawara, les solutions suivantes sont étudiées:

- (1) Réalisation d'un chenal navigable par dérochement.
- (2) Construction d'un chenal navigable contournant les rochers.

La solution (1) présente les avantages suivants:

- utilisation du chenal profond existant en amont et en aval de la barrière rocheuse;
- tracé allongé;
- utilisation maximale du talweg existant pour le chenal navigable, également dans le secteur de la barrière rocheuse;
- suppression partielle des rochers gênant l'écoulement et le charriage.

Les désavantages de cette solution résident dans les travaux de dérochement qui devront être effectués.

La solution (2) présente deux alternatives, à savoir:

- (2a) un bref contournement des rochers et
- (2b) un contournement allongé.

Le bref contournement (2a) est intéressant car

- le chenal naturel en amont et en aval des rochers peut être utilisé en partie;
- des rochers ne devront pas être supprimés et
- les volumes de dragage pourront être maintenus dans des limites acceptables.

Le tracé sinueux est cependant un inconvénient aussi bien du point de vue hydraulique que nautique.

Le contournement allongé (2b) est préférable à la solution (2a) du point de vue hydraulique et nautique.

Etant donné que le lit d'étiage naturel n'est, sur une longueur d'environ 5 km, pas utilisé pour le chenal navigable, d'importants travaux de dragage devront être effectués. De plus, le lit d'étiage actuel devra être endigué par des ouvrages de correction et le nouveau lit devra être également protégé par des ouvrages de correction. Cette solution étant considérablement plus chère que l'alternative (2a), elle ne pourra pas être recommandée pour l'exécution.

Compte tenu de tous les avantages et désavantages, la solution (1) devrait être retenue pour l'exécution.

Pour cette solution, les conditions du courant ont été examinées dans le modèle hydraulique avant et après la suppression des rochers. Il s'est alors avéré que, après l'éloignement des obstacles constitués par les roches, les conditions du courant sont très favorables à la navigation. Un courant transversal nuisible n'ayant pas été constaté, on peut donc renoncer à la réalisation des digues prévue à l'origine. Des données supplémentaires sur ce modèle hydraulique peuvent être prises dans la Mission A.1.6.

Bakel

Par suite de la forte courbe entre les PK 816 et 817, la rive concave de la contre-courbe située en aval est fortement érodée. Ceci entraîne des bifurcations du fleuve et a pour conséquence un élargissement permanent du lit mineur entre les PK 813 et 815.

Une protection des berges et du fond pourrait y remédier mais cette solution est très chère en raison de l'affouillement très profond. De plus, le faible mouillage du passage entre les PK 815 et 815,5 ne pourra pas être ainsi supprimé efficacement.

La construction d'un nouveau chenal navigable entre les îles se présente donc comme alternative. Le chenal navigable actuel pourrait être remblayé avec les matériaux de dragage et être protégé par des ouvrages. La berge concave du nouveau chenal devrait être également protégée pour éviter de nouvelles érosions.

L'ampleur des travaux requis pour les deux solutions est examinée à l'article 8.

Goumal

Etant donné qu'un des plus faibles mouillages de ce tronçon existe à Goumal et que même un mouillage utilisable de 1,5 m seulement ne peut guère être garanti sans dragages d'entretien, le lit du fleuve pourrait être aménagé et rétréci par la construction d'ouvrages, afin d'obtenir la force tractrice nécessaire et le mouillage demandé.

Ceci permettrait également d'acquies de l'expérience pour la réalisation ultérieure des travaux d'aménagement.

6.4.7.7 Travaux d'aménagement à réaliser ultérieurement

Les travaux suivants peuvent être réalisés ultérieurement par la Direction de la Voie Navigable:

- (1) Suppression de la surlargeur de Waoundé et protection des berges,
- (2) Suppression de la surlargeur de Guelle avec protection des berges,
- (3) Aménagement des secteurs très rectilignes du lit mineur entre:
 - PK 648 et 660,
 - PK 663 et 667,
 - PK 672 et 687,
 - PK 701 et 720,
 - PK 740 et 748,
 - PK 760 et 773,
 - PK 779 et 801 - dans la mesure où ces travaux n'ont pas déjà été réalisés au cours de travaux à mettre au concours.
 - PK 801 et 816,

afin de réduire ainsi à la longue les dragages d'entretien.

- (4) Protection des berges dans les secteurs menacés.

6.4.8 Bakel (PK 816) à Ambidédi (PK 905)

6.4.8.1 Généralités

Ce tronçon de 89 km de long est caractérisé par des seuils étendus qui sont souvent dus à la présence d'éléments rocheux. Le fond du lit en amont de Bakel est à au moins +12 m IGN.

6.4.8.2 Tracé

Le tracé du lit mineur est partiellement allongé ou présente de légères sinuosités. Le lit d'étiage forme des méandres avec de grands coudes.

En amont de l'embouchure de la Falémé, quatre passages difficiles présentant des courbes étroites existent sur un secteur de moins de 4 km. Les bancs de sable sont vraisemblablement dus à la crue de la Falémé. Cette crue coule, en raison de la forte pente de la Falémé, avec une vitesse rapide et presque à angle droit dans le fleuve Sénégal, où elle forme une retenue. Ceci a pour conséquence une diminution de la vitesse d'écoulement dans le fleuve Sénégal en amont de l'embouchure de la Falémé et donc un alluvionnement.

6.4.8.3 Largeur du lit mineur

La largeur du lit mineur atteint en aval de l'embouchure de la Falémé 750 m et en amont 550 m. La largeur du lit mineur est parfois ramenée jusqu'à 250 m dans les secteurs des berges rocheuses. Les plus grandes largeurs existent dans les courbes ne possédant pas de berges stables. L'érosion des berges entraîne un élargissement

permanent du lit du fleuve sur la berge concave et la formation de dépôts sur la rive convexe. La grande largeur existant généralement sur ce tronçon est en outre due au fond rocheux. Celui-ci empêche un approfondissement du lit du fleuve et entraîne inévitablement un élargissement du lit.

Les berges du lit mineur se trouvent 4 à 13 m au-dessus du niveau d'eau de référence.

6.4.8.4 Mouillages existants

Les mouillages sont déterminés sur ce tronçon par la largeur du lit mineur et le tracé du fleuve. Par suite du tracé allongé et de la grande largeur, le lit d'étiage présente des méandres dans le lit mineur. Ce tronçon est caractérisé par le fait que les faibles mouillages généralement disponibles sont encore réduits dans le secteur des passages et sont inférieurs à 2 m. Les caractéristiques de ce tronçon sont récapitulées au tableau 6.4.8.4 a).

Tableau 6.4.8.4 a): Endroits critiques entre Bakel et Ambidédi (PK 816 à 903)

PK Localité	Largeur de ... à en m	Caractéristiques du tronçon					
		PK de ... à	Brève description ¹⁾		Mouillage en m (PK)	L en km	¹⁾ Abrévia- tion
816 à 939 Bakel et Golmi	250 à 750		LM allongé avec LE sinueux			23	-
		819,2 à 819,6	Bifurcation du fleuve		-		J
		820 à 821	Passage difficile		1,4(820,2)		S P
		825,4 à 825,6	Rétrécissement du LM à 250 m		-		C
		826,6 à 828,6	Passage difficile		1,1(826,8)		S P
		828,6 à 830,5	Grande largeur de 750 m max. et îlot entre PK 828,6 et 829,2		-		S J
		831,4 à 832,6	Passage difficile		1,5(832)		S P
		834 à 836	Passage		2,0(834,4)		P
839 à 858 Aroundou	300 à 750		LM allongé avec LE sinueux			19	
		839 à 841	Passage difficile		1,6(840)		S P
		841 à 843	Grande largeur de 700 m max. dans la courbe		>2,5		
		846,5	Embouchure de la Falémé, banc de sable sur la rive droite		-		S
		846 à 851	Plusieurs passages difficiles		1,6(849,8)		S P
		856 à 859	LE sinueux dans les courbes du LM d'une largeur de 300 m; Raison: roches dans le lit du fleuve		~3,0(858)		P
858 à 877 Khabou	250 à 500		LM allongé presque rectiligne avec LE sinueux			19	
		861,4	Berge gauche rocheuse		-		-
		862,4 à 870	Secteur rocheux, LM de 400 à 500 m de largeur avec des pas- sages difficiles (Khabou)		1,2(865,5)		S P
877 à 897 Toumbaboun- kané	250 à 550		LM allongé avec LE sinueux			20	
		878 à 880	Passage difficile (Digokori)		1,5(879,3)		S P
		884 à 888	Passages difficiles, grandes largeurs, faible mouillage		~2,0(885)		S P
		889 à 891	Grande largeur, faible mouil- lage		~2,0(890)		S P S P
		892 à 893	Passage difficile		1,8(892,6)		S
		894,5 à 897	Passages difficiles		1,9(896)		S P
897 à 905	300 à 400		LM allongé, presque rectiligne avec LE sinueux		-	8	-
816 à 905	250 à 750	-	-		-	89	-

- ¹⁾ C = Creux
 S = Seuil
 P = Passage difficile
 J = Ilot, bifurcation du fleuve
 E = Erosion

LM = Lit mineur
 LE = Lit d'étiage

Le tableau 6.4.8.4 b) indique les seuils en fonction du débit et du mouillage à réaliser du chenal navigable.

Pour un mouillage de 2,0 m, conformément au tableau 6.4.8.4 b), 8 seuils devront être aménagés.

Une comparaison des seuils déterminés avec ceux indiqués par Ivanov montre que, pour un mouillage du chenal navigable de 2,0 m, un seul seuil supplémentaire a été constaté à Koungani.

Tableau 6.4.8.4 b): Travaux d'aménagement sur le tronçon Bakel - Ambidédi

Emplacement des travaux d'aménagement			Modèle mathématique	Cas de calcul					
				3	4	5	6	7	8
N° d'ordre	Nom du seuil (N° selon Ivanov)	PK de à	Diam ²⁾ RN en m IGN	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
			Débit selon Manantali	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 janv.	cas 7 janv.	PT 1 juin
			Mouillage en m	1,5	2,0	2,5	Chenal effectué selon cas		
			PK critique ³⁾	Travaux à effectuer ¹⁾			4	3	4
							Mouillage disponible en m		
55	Sassimakana (43)	819 823	820,5	-	S	S	2,22	1,73	1,65
56	Koungani	825 829	827,0	S, (R), O	S, (R), O	S, (R), O	2,18	1,68	1,70
57	Golmi (44)	830 836	832,0	-	S, (R)	S, (R)	2,19	1,68	1,70
58	Yaféra (45)	839 844	840,0	-	S, (R)	S, (R)	2,20	> 2,00	1,69
59	Goutioubé (46)	845 851	849,8	S, O	S, O	S, O	2,18	1,82	1,68
60	Ségala	856 859	857,6	-	-	S, (R)	2,40	> 2,00	1,84
61	Khabou (47)	862 871	865,5	S, R, O	S, R, O	S, R, O	2,11	1,61	1,58
62	Digokori (48)	877 880	879,3	S, (R), O	S, (R), O	S, (P), O	2,12	1,64	1,67
63	Gousséla	884 888	885,0	-	-	S, (R)	2,14	> 2,00	1,62
64	Toumbaboukané	889 891	890,0	-	-	S, (R)	2,14	> 2,00	1,63
65	Somone (49)	891 897	892,6	- , O	S, (R), O	S, (R), O	2,13	1,63	1,62
Nombre de seuils -			-	5	8	11	-	-	-

- 1) S = Dragage de sable
 R = Dérochement
 O = Ouvrages de correction

2) Cote de retenue à Diam, la retenue n'a pas d'influence sur la hauteur de la ligne d'eau

3) Emplacement critique selon cas 5

6.4.8.5 Seuils difficiles et endroits critiques

Le tronçon Bakel - Ambidédi est, du point de vue des travaux d'aménagement, le plus difficile des tronçons étudiés jusqu'à présent. En raison du tracé du lit mineur presque rectiligne, du fond dur à rocheux et de la grande largeur du lit, le mouillage est, à quelques exceptions près, très faible sur tout le tronçon pour le débit de référence. Les passages dans les longs secteurs rectilignes sont particulièrement critiques.

Les études de la Mission B.2 et la forme du lit du fleuve permettent de conclure que le fond est très dur ou rocheux et fissuré. Les failles sont en partie remplies de pierres, de cailloux, de gravier et de sable. Par endroits, le rocher compact atteint le fond du lit et apparaît sur les berges.

Le seuil le plus difficile entre Bakel et Ambidédi est celui de Khabou (PK 862 à 871). Dans le lit mineur rectiligne, le lit d'étiage passe cinq fois d'une berge à l'autre sur un secteur d'environ 6 km. Les passages ont une position diagonale à rectangulaire par rapport à l'axe du lit mineur. Pour le débit de référence, le mouillage est inférieur à 1,5 m. Des modifications de ce seuil ont été observées au cours des 10 dernières années notamment dans le secteur en aval. Les trois derniers passages se sont déplacés en direction aval de 300 à 500 m. Les autres passages ont également modifié leur position.

En plus du seuil de Khabou, les seuils importants sont

- Koungani (PK 825 à 829) et
- Digokori (PK 877 à 880)

en raison du faible mouillage pour le débit de référence

ainsi que ceux de

- Goutioubé (PK 845 à 851) et
- Somone (PK 891 à 897)

en raison du tracé du lit d'étiage et des passages difficiles.

6.4.8.6 Travaux d'aménagement à effectuer

a) Généralités

En raison du tracé allongé et de la grande largeur du lit mineur, le mouillage requis dans le chenal navigable ne peut être obtenu qu'en réduisant la largeur du lit. A cet effet, il sera nécessaire de draguer un chenal navigable étroit ou de rétrécir le lit mineur au moyen d'ouvrages de correction.

Du point de vue d'investissement, le dragage d'un chenal navigable est plus avantageux que la construction d'ouvrages de correction. D'importants dragages d'entretien sont cependant nécessaires dans le cas du dragage d'un chenal navigable.

Dans ce contexte, il convient de mentionner que, à la suite de la régularisation du débit par le barrage de Manantali, le débit sera plus élevé qu'actuellement pendant la période d'étiage et plus faible pendant la période de crue. Ceci aura des incidences positives sur la stabilité du lit d'étiage.

L'aménagement au moyen d'ouvrages de correction nécessite des investissements initiaux plus importants mais réduit les coûts d'entretien.

La solution combinée suivante est recommandée pour la première phase d'aménagement:

- réalisation d'un chenal navigable au moyen de dragage et
- ouvrages de correction à des endroits particulièrement critiques ayant un mouillage inférieur à 1,5 m ou à des passages défavorables avec éventuellement des dragages supplémentaires.

e) Aménagement du seuil de Koungani

Afin de pouvoir supprimer de façon durable les passages difficiles près de Koungani, des ouvrages de correction devront être exécutés en plus des travaux de dragage. Ces ouvrages pourront être également mis au concours en tant qu'alternatives.

6.4.8.7 Travaux d'aménagement à effectuer ultérieurement

La Direction de la Voie Navigable devra, en plus des dragages d'entretien, construire d'autres ouvrages de correction qui auront pour fonction:

- d'éviter d'autres élargissements du lit mineur par suite de l'érosion des berges et
- de restreindre les surlargeurs afin de maintenir la force tractrice du fleuve et de réduire ainsi les dragages d'entretien.

Des ouvrages de correction pourraient être ultérieurement nécessaires à:

- Sassimakana,
- Golmi et
- Yaféra.

6.4.9 Ambidédi (PK 905) à Kayes (PK 948)

6.4.9.1 Généralités

Ce tronçon de 43 km est situé dans une région rocheuse. Les roches apparaissent non seulement à certains endroits mais aussi sur toute la largeur du lit et sur une grande longueur. Le fond est à peu près horizontal dans le profil en travers, de sorte que toute sa largeur est faiblement submergée lors des basses eaux.

6.4.9.2 Tracé

Le lit mineur a un tracé presque rectiligne. Des courbes d'un rayon inférieur à 1 000 m n'existent pas. A la différence des autres tronçons, le lit d'étiage est également très allongé. Ceci résulte entre autres de l'absence de transport de matériaux solides.

6.4.9.3 Largeur du lit mineur

Le lit mineur a 300 à 450 m de largeur. En raison des variations des sections des profils en travers, la pente de la ligne d'eau est assez inconstante pour le débit de référence. Pour un mouillage de 2,0 m, la pente varie entre 2 et 30 cm/km. Aux endroits où la ligne d'eau a une forte pente, les vitesses d'écoulement sont élevées et peuvent atteindre 1,0 m/s (3,6 km/h) pour le débit de référence.

6.4.9.4 Mouillages existants

Des mouillages très faibles et des barrières rocheuses limitent la navigation sur ce tronçon. La forme du lit du fleuve nécessite des travaux d'aménagement sur presque toute la longueur du tronçon.

Les caractéristiques des différents secteurs sont récapitulées au tableau 6.4.9.4 a).

Le tableau 6.4.9.4 b) donne la liste des seuils à aménager en fonction du débit et du mouillage à réaliser dans le chenal navigable.

Une comparaison de cette liste avec celle donnée par Ivanov montre que, pour un mouillage d'aménagement de 2,0 m,

- Moussala, PK 912 à 914 et
- Samé, PK 932 à 934

devront être aménagés en supplément.

Tableau 6.4.9.4 a): Endroits critiques entre Ambidédi et Kayes (PK 905 à PK 948)

FK Localité	Largeur de ... à en m	Caractéristiques du tronçon				
		PK de ... à	Brève description ¹⁾	Mouillage en m (PK)	L en km	¹⁾ Abrévia- tion
905 à 915 Ambidédi	300-450		LM allongé, presque rectiligne avec un LE faiblement sinueux	-	10	-
		905 à 908	LM de 320 m, mouillé sur toute la largeur, d'où faible mouillage	1,7 (906,4)		S
		909 à 914	LM de 450 m, mouillé sur presque toute sa largeur d'où faible mouillage, passage difficile	1,7 (913)		S P
915 à 933 Samé	300-400		LM très allongé, parfois rectiligne, cours du fleuve avec LE stable	-	10	-
		915 à 918	LE de 400 m, le plan d'eau couvre toute la largeur, faible mouillage, pas d'affouillement malgré la courbe en raison du fond rocheux	2,0 (916,8)		S
		919 à 920	Rétrécissement à 300 m, mouillage suffisant	-		S
		920,5 à 923	LM de 300 m, fond rocheux, presque horizontal dans le profil en travers entre +19,0 et 19,5 m IGN	1,4 (922,2)		S
		923 à 928	LM de 300 à 400 m, fond rocheux, presque horizontal dans le profil en travers entre +19,0 et 20,0 m IGN	0,9 (924)		S
		932 à 934	Seuil au PK 933	2,5 (933)		S
933 à 948 Kayes	300-450	-	Cours du fleuve très allongé	-	15	-
		942 à 946	Mouillage trop faible en raison de la grande largeur	1,7 (945)		-
905 à 948	300-450	-	-	-	43	-

¹⁾ C = Creux

S = Seuil

P = Passage difficile

J = Ilot, bifurcation du fleuve

E = Erosion.

LM = Lit mineur

LE = Lit d'étiage

Tableau 6.4.9.4 b): Travaux d'aménagement sur le tronçon Ambidédi - Kayes

Emplacement des travaux d'aménagement			Modèle mathématique	Cas de calcul					
				3	4	5	6	7	8
N° d'ordre	Nom du seuil (N° selon Ivanov)	PK de à	Diamas ²⁾ RN en m IGN	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
			Débit selon Manantali	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 avril	cas 7 janv.	cas 7 janv.	PT 1 juin
			Mouillage en m	1,5	2,0	2,5	Chenal effectué selon cas		
							4	3	4
			PK critique ³⁾	Travaux à effectuer ¹⁾			Mouillage disponible en m		
66	Ambidédi (50)	905 912	906,4	-	(S), R	(S), R	2,12	1,65	1,60
67	Moussala	912 914	913,0	S, (R)	S, R	S, R	2,10	1,59	1,65
68	Ganyi	915 918	916,8	-	-	S, R	2,27	> 2,00	1,74
69	Tamboukané (51)	920 923	922,2	(S), R	(S), R	(S), R	2,11	1,62	1,57
70	Dakandapé (52)	923 928	924,0	(S), R	(S), R	(S), R	2,08	1,57	1,61
71	Samé	932 934	933,0	-	-	(S), R	> 2,50	> 2,00	> 2,00
72	Ortogorel (53)	938 946	945,0	-	S, R	S, R	2,14	1,63	1,64
Nombre de seuils				3	5	7			

- 1) S = Dragage de sable
 R = Dérochement
 O = Ouvrages de correction

2) Cote de retenue à Diamas, la retenue n'a pas d'influence sur la hauteur de la ligne d'eau

3) Emplacement critique selon cas 5

6.4.9.5 Seuils difficiles et endroits critiques

L'ensemble du tronçon, en raison du fond rocheux et large et donc du faible mouillage, doit être considéré comme critique. Les travaux d'aménagement nécessaires pour le mouillage à aménager à 2,0 m dépassent ainsi de beaucoup l'ampleur des travaux sur les autres tronçons, étant donné que des travaux de dérochement ou des ouvrages de correction devront être exécutés (voir l'article 8).

Le tableau 6.4.9.4 a) montre que, déjà pour un mouillage utilisable de 2,0 m, un chenal navigable devra être réalisé dans le sol rocheux dans des secteurs d'une longueur totale d'environ 21 km.

6.4.9.6 Travaux d'aménagement à effectuer

a) Généralités

Les travaux devront être essentiellement effectués entre les

- PK 905 et 914, Ambidédi et Moussala
- PK 920 et 928, Tamboukané et Dakandapé
- PK 942 et 946, Ortogorel.

En plus des dragages de sable à Moussala et Ortogorel, la réalisation du chenal navigable nécessitera notamment des travaux de dérochement.

L'aménagement des secteurs rocheux peut avoir lieu comme suit:

- réalisation d'un chenal navigable par approfondissement du fond du lit,
- rétrécissement du lit mineur par des ouvrages de correction et
- combinaison des deux méthodes d'aménagement précitées.

Les coûts afférents aux différentes solutions sont cependant déterminants pour le choix définitif des travaux à effectuer.

b) Réalisation d'un chenal navigable par dérochement

Le chenal navigable doit être essentiellement réalisé dans le fond rocheux. Les coûts de réalisation sont par conséquent très élevés. Les frais d'entretien sont par contre négligeables car le nouveau lit du chenal est stable et le charriage solide est très faible.

Les cas 3 à 5 calculés à l'aide du modèle mathématique sont basés sur un chenal navigable réalisé dans les rochers et présentant un mouillage de 1,5 m, 2,0 et 2,5 m. En raison de ce chenal, le niveau d'eau descend en amont des endroits où le fond est abaissé. La différence maximale des niveaux d'eau est de 20 cm si le mouillage est relevé de 1,5 m à 2,5 m.

c) Rétrécissement du lit mineur par des ouvrages de correction

Les ouvrages sont destinés à rétrécir le lit mineur afin de garantir sur toute la longueur le mouillage demandé pour le débit de référence. Pour un débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, un mouillage de 2,5 m peut être obtenu dans un lit de fleuve d'une largeur d'env. 250 m environ.

Les investissements pour ces ouvrages sont également très élevés. Les ouvrages exigent d'autre part des frais d'entretien plus élevés que le chenal navigable réalisé par dérochement.

d) Solution combinée

Une combinaison des solutions indiquées est recommandable si celle-ci entraîne une réduction des coûts. Ceci est le cas lorsque les matériaux prélevés du chenal existent en quantité suffisante et qu'ils peuvent être utilisés pour la construction des ouvrages.

Cette solution présente de plus les avantages suivants:

- la longueur des épis peut être limitée et
- le niveau d'eau ne doit pas être relevé sur toute la longueur du tronçon, en raison de certains points critiques.

Le choix de la solution optimale devra en outre tenir compte du fait que, en raison des contraintes financières et économiques, le chenal navigable ne pourra, dans le cadre des travaux à mettre au concours, vraisemblablement pas être réalisé immédiatement pour l'enfoncement total de 2,0 m, mais qu'un aménagement progressif devrait avoir lieu. L'approfondissement du chenal dans le secteur rocheux est difficile et cher en raison des travaux à réaliser sous l'eau et il ne peut probablement pas être exécuté par la "Direction de la Voie Navigable". La Direction pourra cependant réduire ultérieurement la section mouillée en construisant des ouvrages de correction afin d'augmenter le mouillage.

e) Modèle hydraulique

Il a été étudié dans le modèle hydraulique si une élévation du niveau d'eau de 0,50 m peut être obtenue par des ouvrages de correction. Les essais ont montré que cette possibilité était en principe réalisable. La largeur à aménager convenable et l'espace entre les épis sont commentés à la Mission A.1.6.

6.4.9.7 Travaux d'aménagement à effectuer ultérieurement

La Direction de la Voie Navigable devra effectuer ultérieurement

- des dragages d'entretien de très faible ampleur en comparaison avec les autres secteurs,
- des travaux d'entretien aux ouvrages existants et
- la construction de nouveaux ouvrages de correction pour augmenter le mouillage réalisé au cours de la première phase d'aménagement.

6.4.10 Bras Doué (PK 0 à PK 228)

6.4.10.1 Importance du Doué pour la navigation

Contrairement au bras Sénégal, le bras Doué est actuellement utilisé, également lors des crues, seulement par la navigation locale avec de petits bateaux.

Le tronçon Leboudou-Doué pourrait être, en principe, utilisé par la navigation selon les possibilités suivantes:

- a) Aménagement du bras Sénégal uniquement, comme étudié à l'art. 6.4.5.
- b) Aménagement du bras Doué uniquement, pour les bateaux et les convois prévus.

La largeur plus faible du lit mineur et le nombre plus important de courbes (71 courbes d'un rayon inférieur à 1 000 m) exigent des investissements et des frais d'entretien plus élevés. En outre, sur ce tronçon, un état riverain seulement pourrait profiter de la navigation.

- c) Aménagement des deux bras du fleuve pour une navigation à sens unique.

La réalisation de deux chenaux navigables est, également si chaque largeur est plus petite, moins favorable du point de vue hydraulique et exige des investissements et des frais d'entretien considérablement plus élevés qu'un seul chenal navigable plus large et à deux voies.

La présente étude sera donc basée sur le fait que seul le chenal navigable dans le bras Sénégal sera aménagé. Il sera étudié pour le bras Doué, si des barges automotrices M1 d'un enfoncement de 1,0 m peuvent être mises en service pour la navigation locale lors du débit de référence. Le chenal navigable devrait avoir alors une profondeur (T_{SN}) de 1,70 m et une largeur de 30 m.

6.4.10.2 Débit et niveau d'eau

Les études suivantes sont basées sur le débit de référence et la répartition naturelle du débit entre les bras Doué et Sénégal, c'est-à-dire que 44 % s'écoulent dans le Doué.

Le niveau d'eau a été déterminé à l'aide du modèle mathématique. L'exposé de l'art. 6.4.5.1, concernant les pertes pour l'agriculture et par évaporation, s'applique aussi au Doué.

Le mouillage disponible a été déterminé en utilisant les résultats du modèle mathématique ainsi que les profils en long et en travers. En outre, l'influence du barrage de Diama a été prise en considération pour une cote de retenue de +1,5 m IGN. Les effets de la retenue atteignent approximativement le PK 140 du Doué.

6.4.10.3 Tracé

Le bras Doué d'une longueur de 228 km est parfois très sinueux et parfois très allongé. Le Doué a environ 70 courbes d'un rayon inférieur à 1 000 m dont 3 ont un rayon d'environ 200 m.

6.4.10.4 Largeur du lit mineur

Le lit mineur a généralement 80 à 200 m de largeur; des élargissements locaux atteignent cependant 300 m. Les berges se trouvent 3 à 8 m au-dessus du niveau de ré-

férence. Dans le tronçon en aval, les berges n'ont parfois qu'une hauteur de 2 m et elles atteignent localement 14 m dans le tronçon en amont.

6.4.10.5 Mouillages existants

Sans l'effet de la retenue du barrage de Diama, déjà un mouillage de 1,7 m n'est pas atteint à 13 endroits. Dans ce cas, la mise en service de barges automotrices n'est possible pour le débit de référence que si des travaux d'aménagement importants sont effectués.

Grâce à la retenue du barrage de Diama, le niveau d'eau dans la partie en aval du Doué est relevé de sorte que, jusqu'au PK 100, le mouillage de 1,7 m est atteint. Dans la partie amont, entre les PK 100 et 191, les conditions sont moins favorables. Un mouillage d'au moins 1,7 m n'est pas atteint à six endroits. Ces endroits de faible profondeur s'étendent sur une longueur totale d'environ 17 km, dont 12 km se trouvent entre les PK 168 et 192. Les tableaux 6.4.10.5 a) et b) donnent de plus amples détails à ce sujet.

Tableau 6.4.10.5 a) : Endroits critiques dans le bras Doué (PK 0 à 228)

PK Localité	Largeur de ... à en m	Caractéristiques du tronçon				
		PK de ... à	Brève description ²⁾	Mouillage ¹⁾ en m (PK)	L en km	Abrévia- tion ²⁾
0 à 37 Wali-Diala	80-150	-	Cours du fleuve très sinueux avec de petits rayons, $R_{min.} = 300$ m	-	37	-
37 à 65 Guede	80-150	-	Cours du fleuve très sinueux avec des boucles étroites, $R_{min.} = 200$ m, bancs de sable isolés sur la rive convexe et érosion de la berge concave	>1,5	28	E
65 à 91 Ndjoum	80-150	65 à 78,5	Cours du fleuve très sinueux avec des boucles parfois étroites, $R_{min.} = 200$ m	-	26	-
		78,5 à 91	Cours du fleuve très sinueux	-		-
		85 à 87	Mouillage très faible	1,3(85,5)		S
91 à 114 Diamal	80-180	-	Cours allongé du fleuve avec quel- ques courbes très prononcées	-	23	-
		107,5 à 108	Mouillage très faible en raison d'une grande largeur (180 m)	1,2(108)		-
114 à 139 Hounoko-Aéré	80-180	-	Cours du fleuve très sinueux avec des boucles et des coudes $R_{min.} = 300$ m	-	25	-
		122	Erosion de la berge, grande largeur (200 m), faible mouillage	<1,0(122)		S E
		124,5 à 125,5	Grande largeur (160 m)	1,1(125)		S
		127	Grande largeur (140 m)	0,9(127)		S
		133	Grande largeur	1,4(133)		S
		135 à 136	Chenal navigable étroit, $B \sim 25$ m	1,0(136)		S
139 à 165 Arame	80-200	-	Cours du fleuve allongé avec des boucles localement étroites, $R_{min.} = 250$ m, pas d'influence de la retenue du barrage de Diamal	-	26	-
		156 à 160	Secteur rectiligne avec une grande largeur (200 m)	>2,0		-
		162	Chenal navigable étroit (25 m)	1,2(162)		S
		160 à 165,5	Boucle très étroite, largeur de la langue de terre seulement env. 80 m au PK 160,8	-		-
165 à 196 Madina Ndiathebes	80-300	-	Cours du fleuve très sinueux avec un secteur intermédiaire allongé du PK 168 au PK 173	-	31	-
		168 à 172,5	LM rectiligne ($B = 300$ m) avec LE sinueux	1,0(169) 1,4(171)		S
		173,7 à 175	LM rectiligne ($B = 300$ m) avec banc de sable et érosion de la berge	1,2(174)		S E
		187,8 à 188,3	Erosion et banc de sable dans la courbe	1,0(188)		S E
		190,8 à 191,3	LM rectiligne ($B = 200$ m), LE sinueux	1,3(191)		S
196 à 218 Mboumba	150-300	-	Lit du fleuve faiblement sinueux, $R_{min.} = 400$ m	>2,0	22	-
218 à 228 Toufoundé Gandé	100-180	-	Cours du fleuve allongé	-	10	-

1) RN de Diamal: +1,5 m IGN

2) C = Creux
S = Seuil
P = Passage difficile
J = Ilot, bifurcation du fleuve
E = Erosion.LM = Lit mineur
LE = Lit d'étiage

Tableau 6.4.10.5 b): Mouillages pour le bras du Doué

No. d'ordre	Nom des seuils	PK de à	Débit selon le cas 7 du Groupement Manantali, mois d'avril		
			PK cri- tique	Mouillage sans barrage de Diama	Mouillage pour une RN à Diama de +1,5 m IGN
101	Niandané	18 19	19	0,7	2,0
102	-	42,5 43,8	43	1,5	> 2,2
103	Aniam Taunguél	61,5 62,3	62,3	0,9	1,8
104	Gamadji	75 77	76	1,5	2,3
105	Ndioum	83 84,5	83	1,5	2,1
106	Diamal	101,5 102,5	102	1,5	1,8
107	-	107,5 108,5	108	1,1	1,5
108	Cogua	121,5 122,5	122	0,8	1,0
109	-	124,5 125,5	125	1,1	1,3
110	-	126,5 128,5	127	0,9	1,0
111	Koïlel	136 137	136	1,6	1,7
112	Madina Ndiathébés	168 175	169	1,4	1,4
113	Fondé Gandé	188 192	191	1,1	1,1
Nombre de seuils ayant un mouillage inférieur à 1,7 m			-	13	6

6.4.10.6 Travaux d'aménagement

La mise en service sur le Doué des mêmes barges automotrices que sur le fleuve Sénégal n'étant actuellement pas nécessaire, il pourra tout d'abord être renoncé à un aménagement du Doué. En cas de besoin, un mouillage de 1,7 m pourrait être réalisé ultérieurement et progressivement par des travaux de dragage. Le matériel de la Direction pourra être utilisé à cet effet, étant donné que celui-ci ne sera pas utilisé pendant toute l'année.

6.4.11 Travaux à réaliser

Les travaux à mettre au concours sont réunis au tableau suivant.

Tronçon	Travaux à exécuter			Ouvrages				Remarque
	Dragage	Déroctage	Ouvrage	PK de à	Emplacement	But et nature de l'ouvrage		
Chenal d'accès à St-Louis	Des dragages et ouvrages à exécuter dans le cadre de la construction du port de St-Louis						Ne fait pas partie de cette étude	
St-Louis à Leboudou-Doué PK 0 - 244	Seulement pour des caboteurs	Non	Non	26	Diama	Barrage et écluse	Ne fait pas partie de cette étude	
Leboudou-Doué à Vending PK 244 - 489	Pour les bateaux fluviaux seulement en amont de Podor	Oui	Oui	439 - 443	Dioudé Diabé	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander	
				454,3-455,4	Diamel-Vidimé	Protection de la berge gauche	Facultatif	
				382 - 385	Boghé	Fermeture du bras secondaire	Facultatif	
Vending à Matam PK 489 - 637	Oui	Oui	Oui	541 - 546	Kaédi	Protection de la berge droite	Facultatif	
				583 - 587	N'Guidjilone	Epis et digues pour la fermeture du bras secondaire	A recommander	
				614	Koundé	Digues pour la fermeture du bras secondaire	A recommander	
Matam à Bakel PK 637 - 816	Oui	Oui	Oui	718 - 720	Goumal	Construction des épis pour la protection du chenal navigable et comme modèle pour ce tronçon	A recommander	
				814 - 816	Bakel	Protection de la berge droite, ou mieux construction et protection d'un nouveau chenal navigable avec des épis	Facultatif	
Bakel à Ambidédi PK 816 - 905	Oui	Oui	Oui	825 - 829	Koungari	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander	
				845 - 851	Goutioubé	Embouchure de la Falémé: Construction d'une digue pour guider le courant de la Falémé dans la direction du fleuve Sénégal	Obligatoire	
				862 - 871	Khabou	Protection du chenal avec des ouvrages	Obligatoire	
				877 - 880	Digokori	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander	
				891 - 897	Somone	Protection du chenal avec des ouvrages	A recommander	
Ambidédi à Kayes PK 905 - 948	Oui	Oui	Oui	920 - 928	Tamboukané Dakandapé	Construction d'un chenal navigable par déroctage et dragage et, alternativement, avec des ouvrages supplémentaires	Alternative	
Bras du Doué PK 0 - 228	Des travaux ne seront pas exécutés pendant la première phase d'aménagement. Si nécessaire, des dragages peuvent être exécutés ultérieurement par la Direction.						-	

7. Mouillages disponibles en fonction du débit et de la cote de la retenue du barrage de Diama

7.1 Généralités

Les mouillages au-dessus des seuils sont indiqués à l'art. 6 pour les différents tronçons du fleuve et pour l'écoulement du débit de référence. Le débit de référence est le débit du mois d'avril du "cas 7" de l'étude de Manantali. Ce débit est le plus faible débit mensuel possible au cours de l'année. L'art. 6 donne également les endroits où, pour le débit de référence précité, des travaux d'aménagement sont nécessaires pour la réalisation d'un chenal navigable de 1,5, 2,0 et 2,5 m de profondeur.

Afin de déterminer la dépendance du mouillage par rapport au débit, la ligne d'eau pour le débit du mois de janvier a été calculée conformément au tableau 5.2.1.1 (cas 7 et 8) à partir d'un mouillage de 1,5 et 2,0 m, conformément aux cas 3 et 4. Le débit du mois de janvier est atteint ou dépassé pendant 8 mois de l'année.

Sur la base du cas 4, qui prévoit un mouillage du chenal navigable de 2,0 m pour l'écoulement du débit de référence, la modification du mouillage a été également analysée pour le cas où le débit du mois de juin de la phase transitoire, PT1, est adopté à la place du débit de référence (cas 8).

Les incidences sur le mouillage utilisable ont été enfin examinées pour le cas où la cote de la retenue du barrage de Diama est portée de +1,5 m IGN à +2,5 m IGN.

Les résultats de ces études sont récapitulés au tableau 7.1.

Tableau 7.1: Modification des mouillages en cm

Cas	6	7	8	9
Débit du mois de	Janv., ¹⁾ cas 7 ¹⁾	Janv., ¹⁾ cas 7 ¹⁾	Juin, PT1 ²⁾	Avril, cas 7
RN de Diama ³⁾	+1,5	+1,5	+1,5	+2,5
Modification des mouillages	ΔT_{\min} en cm par rapport au			
	Cas 4 T = 2,0 m	Cas 3 T = 1,5 m	Cas 4 T = 2,0 m	Cas 4 T = 2,0 m
St.Louis - Leboudou- Doué	Aucune influence sur le trafic fluvial			
Leboudou- Doué - Vending	+2	+5	-19	+6
Vending - Matam	+15	+24	-31	0
Matam - Bakel	+22	+23	-38	0
Bakel - Ambidédi	+11	+11	-42	0
Ambidédi - Kayes	+8	+7	-43	0
Leboudou- Doué - Kayes	+2 à +22	+5 à +23	-19 à -43	0 à +6

1) Cas 7 du Groupement Manantali.

2) Phase transitoire PT 1 du Groupement Manantali.

3) Cote de retenue en m IGN.

7.2 Augmentation du mouillage pour le débit du mois de janvier

Le tableau 7.1 montre que, pour un mouillage à aménager de 2,0 m, conformément au cas 4, le mouillage lors de l'écoulement du débit du mois de janvier est de 2 à 22 cm supérieur que lors de l'écoulement du débit de référence. Le débit plus élevé au cours du mois de janvier ne profite pas directement à la navigation car la valeur minimale est déterminante pour l'utilisation du mouillage.

Afin de garantir un mouillage minimal de 2,10 m au-dessus des seuils, 7 seuils devraient être aménagés en plus sur le tronçon Leboudou-Doué - Vending et 1 seuil entre Ambidédi et Kayes.

Le tableau 7.2 donne une vue d'ensemble des travaux supplémentaires qui seraient requis si une profondeur de 2,10, 2,20 ou 2,25 m devait être utilisée en prenant pour base le débit du mois de janvier.

Les tableaux 7.1 et 7.2 montrent que les conditions sont un peu plus favorables pour le cas 7.

Tableau 7.2: Mouillages possibles pendant 8 mois

Cas de calcul		6			7		
Chenal aménagé selon:		Cas 4 (T = 2,0 m)			Cas 3 (T = 1,5 m)		
Travaux supplém.		Non	Oui		Non	Oui	
Tronçon	PK	T en m	Mouillage demandé en m	Nb. ¹⁾	T en m	Mouillage demandé en m	Nb. ¹⁾
Leboudou-Doué - Vending	244	2,00	2,10	7	1,55	1,60	4
	489		2,20	18		1,70	10
			2,25	18		1,75	11
Vending - Matam	489	2,15	2,10	0	1,70	1,60	0
	637		2,20	3		1,70	0
			2,25	7		1,75	1
Matam - Bakel	637	2,20	2,10	0	1,70	1,60	0
	816		2,20	0		1,70	0
			2,25	6		1,75	2
Bakel - Ambidédi	816	2,10	2,10	0	1,60	1,60	0
	905		2,20	8		1,70	5
			2,25	10		1,75	6
Ambidédi - Kayes	905	2,05	2,10	1	1,55	1,60	2
	948		2,20	5		1,70	5
			2,25	5		1,75	5
Leboudou-Doué - Kayes	244	2,00	2,10	8	1,55	1,60	6
	948		2,20	34		1,70	20
			2,25	46		1,75	27

1) Nb. = Nombre de seuils à aménager en supplément pour garantir le mouillage demandé.

7.3 Mouillage pendant la phase transitoire, PT1

Lors de la phase transitoire, le débit à Kayes au mois de juin pourra être de $94 \text{ m}^3/\text{s}$ inférieur au débit de référence. A l'exception de la période de la crue, les débits seront également plus faibles au cours des autres mois de l'année. En direction aval, le débit de la phase transitoire s'ajuste au débit de référence, étant donné que les prélèvements pour l'irrigation sont inférieurs pendant la phase transitoire.

Le niveau d'eau et le mouillage utilisable pendant la phase transitoire ont été examinés dans le cas 8 du modèle mathématique, en se basant sur un mouillage de 2,0 m du chenal navigable, conformément au cas 4.

Les diminutions du mouillage dans les différents tronçons du fleuve sont récapitulées au tableau 7.1 et elles varient entre 19 et 43 cm.

Le tableau 7.3 indique le mouillage dans les différents tronçons du fleuve sans travaux d'aménagement supplémentaires. Ce tableau donne également un aperçu des travaux d'aménagement supplémentaires au cas où un mouillage de 1,7, 1,8 et 1,9 m devrait être obtenu pendant la phase transitoire.

Sur toute la longueur du fleuve, sans la réalisation de travaux d'aménagement supplémentaires, le mouillage utilisable est limité à 1,55 m, en raison des faibles mouillages entre Bakel et Kayes. Des travaux d'aménagement supplémentaires seront nécessaires à 22 seuils pour l'obtention d'un mouillage de 1,7 m pendant la phase transitoire et à 37 seuils pour l'obtention d'un mouillage de 1,8 m.

Tableau 7.3: Mouillages possibles lors de la phase transitoire, PT

(Chenal aménagé selon le cas 4, $T = 2,0$ m)

Travaux supplém.		Non	Oui		
Tronçon	PK	T en m	Mouillage demandé en m	Nb. ¹⁾	
Leboudou - Doué - Vending	244	1,80	1,70	0	
	489		1,80	0	
			1,90	9	
Vending - Matam	489	1,70	1,70	0	
	637		1,80	8	
			1,90	10	
Matam - Bakel	637	1,60	1,70	9	
	816		1,80	14	
			1,90	16	
Bakel - Ambidédi	816	1,55	1,70	8	
	905		1,80	10	
			1,90	11	
Ambidédi - Kayes	905	1,55	1,70	5	
	948		1,80	5	
			1,90	6	
Leboudou - Doué - Kayes	244	1,55	1,70	22	
	948		1,80	37	
			1,90	52	

1) Nb. = Nombre de seuils à aménager en supplément pour garantir le mouillage demandé.

7.4 Incidences de la cote de retenue de +2,5 m IGN du barrage de Diama sur les mouillages

Le relèvement de la retenue de +1,5 à +2,5 m IGN entraîne une augmentation d'au moins 6 cm du mouillage par rapport au cas 4 (mouillage d'aménagement de 2 m) sur le tronçon Leboudou-Doué (PK 244) - Vending (PK 489).

Les approfondissements (ΔT) et mouillages (T) suivants sont obtenus sur ce tronçon:

- jusqu'à Podor....., PK 266: $\Delta T = 1,0 \text{ m}$, $T > 3,0 \text{ m}$
- jusqu'à Boghé....., PK 382: $\Delta T = 0,8 \text{ m}$, $T = 2,8 \text{ m}$
- jusqu'à Dioudé Diabé...., PK 440: $\Delta T = 0,4 \text{ m}$, $T = 2,4 \text{ m}$
- jusqu'à Saldé....., PK 481: $\Delta T = 0,1 \text{ m}$, $T = 2,1 \text{ m}$
- jusqu'à l'embranchement
du Doué....., PK 489: $\Delta T = 0,06 \text{ m}$, $T = 2,06 \text{ m}$.

En amont de Vending, l'influence de la retenue est négligeable et elle disparaît totalement aux environs du PK 540.

8. Volume des travaux à effectuer8.1 Volume des travaux selon des études antérieures8.1.1 Volume des travaux selon Beziukov

L'estimation des volumes selon Beziukov [6] est basée sur les études hydrologiques élaborées dans le cadre du projet REG-86 par Ivanov [1] et sur des photos d'un certain nombre de seuils. En complément des levés de seuils effectués par le BCEOM en 1966 ont été utilisés.

Le bateau de référence suivant a été choisi pour déterminer le gabarit du chenal navigable.

Longueur: 60 m

Largeur: 10 m

Enfoncement: 1,3 m.

Pour ce bateau et une circulation à voie unique, une largeur de 20 m est nécessaire dans le secteur des seuils.

Le plus petit rayon de courbure admis est de 250 m.

L'étude ne mentionne rien au sujet d'un élargissement du chenal navigable dans les courbes de petits rayons.

La détermination du mouillage est basée sur un débit de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel.

Le volume des travaux lors de ce débit est examiné pour un enfoncement de 0,8 m, 1,0 m et 1,2 m.

Il convient de mentionner que la différence entre enfoncement et mouillage n'est pas claire dans l'étude de Beziukov, car les deux termes sont désignés le plus souvent par "tirant" et parfois également par "profondeur". Le pied de pilote pris pour la détermination des volumes de dragage n'est pas indiqué.

a) Dragage

Le calcul du volume de dragage est basé sur les 13 seuils relevés entre St-Louis et Ambidédi. Les volumes de dragage de 13 autres seuils indiqués par Ivanov, n'ont été qu'estimés. Le tableau 8.1.1 a) récapitule les résultats du calcul des volumes de dragage.

Tableau 8.1.1 a): Volumes de dragage selon Beziukov

Désignation	Volume de dragage en m ³ pour un enfoncement de		
	0,8 m	1,0 m	1,2 m
Seuils selon le levé de BCEOM	9 225	28 245	58 600
En cas d'imprévu	15 000	26 000	40 000
Total, environ	25 000	55 000	100 000
Seuils supplémentaires selon Ivanov	25 000	55 000	100 000
Total	50 000	110 000	200 000
Supplément pour des travaux d'entretien	15 000	30 000	60 000
Total général	65 000	140 000	260 000

b) Dérochement

Selon Beziukov, des matériaux rocheux devront être excavés à quatre seuils de la "Vallée" et sur le secteur rocheux entre Ambidédi et Kayes.

Le tableau 8.1.1 b) indique les volumes de dérochement pour différents enfoncements.

Tableau 8.1.1 b): Volumes de dérochement selon Beziukov

Désignation	Volume de dérochement en m ³ pour un enfoncement de			
	0,8 m		1,0 m	1,2 m
Seuils rocheux de la Vallée	4 410		7 580	13 960
Seuils rocheux entre Ambidédi et Kayes	650		5 670	15 825
Total	5 060		13 250	29 785

Indépendamment du mouillage, 17 300 m³ de cailloux devront être également déblayés dont 2 800 m³ dans la Vallée et 14 500 m³ dans le secteur rocheux entre Ambidédi et Kayes.

c) Ouvrages de correction

Les matériaux nécessaires pour les ouvrages de correction ont été indiqués par Beziukov pour l'aménagement des principaux seuils et le rétrécissement du lit du fleuve dans les secteurs critiques. Sur la base du seuil de Khabou, les matériaux nécessaires pour la construction d'épis sur un secteur de fleuve de 1 km ont été estimés à 1 500 m³. Indépendamment du mouillage choisi du chenal navigable, il en résulte les volumes de pierres suivants pour les épis.

Tableau 8.1.1 c): Besoin en matériaux pour des ouvrages de correction selon Beziukov

Tronçon	Longueur des seuils rectifiés, en km	Volume de pierres en m ³
St-Louis - Ambidédi	16	24 000
Ambidédi - Kayes	21	31 500
Total	37	55 500

8.1.2 Estimation des volumes par le Groupement Manantali

Sur la base des études hydrologiques selon Ivanov [1] et du débit conformément au cas 7, le Groupement Manantali a déterminé les mouillages pour tous les seuils et calculé les volumes de dragage pour un enfoncement de 1,5, 1,9 et 2,3 m. Le pied de pilote a été fixé à 0,30 m.

Pour les trois cas précités, il en résulte un mouillage du chenal navigable de 1,8, 2,2 et 2,6 m.

La largeur du chenal navigable est de 60 m dans les secteurs rectilignes. Dans les coudes ayant des rayons minimaux de 250 m, le chenal doit être élargi jusqu'à 90 m.

Tableau 8.1.2: Travaux de dragage et de dérochement selon le Groupement Manantali

Mouillage en m	Nombre de seuils à traiter	Volumes en m ³	
		Dragage	Dérochement
1,80	10	230 000	250 000
2,20	23	1 640 000	895 000
2,60	40	3 916 000	1 484 000

Les volumes indiqués sont valables pour la navigabilité du fleuve Sénégal pendant toute l'année entre St-Louis et Kayes. L'influence du barrage de Diama n'a pas été prise en considération.

Les besoins en matériaux pour les épis ont été estimés pour un mouillage de 1,8 m, et il a été admis que 10 seuils devront être régularisés avec en moyenne 7 épis d'une longueur d'environ 150 m. Pour une section moyenne d'un épi de 7 m², il en résulte un volume d'environ 1 000 m³ par épi et ainsi pour tous les seuils des besoins en matériaux de $10 \times 7 \times 1\,000 = 70\,000 \text{ m}^3$.

8.2 Volume des travaux conformément à la description des prestations indiquée à l'article 6

8.2.1 Généralités

Le volume des travaux à effectuer calculé dans cette étude est basé sur:

- le débit de référence cf. aux art. 5.2.2 et 5.7,
- une largeur normale du chenal de 55 m pour des rayons de courbure jusqu'à 1 000 m; les largeurs indiquées à l'art. 5.7.2 pour le convoi M3 sont valables pour de plus petits rayons,
- un mouillage du chenal navigable de 1,5 à 3,0 m lors d'une cote de retenue de +1,5 m IGN du barrage de Dama,
- un mouillage du chenal navigable de 1,5 et 2,0 m sans prise en considération d'une retenue à Dama (cas de calcul 1a et 1b), ainsi que
- les critères du tracé conformément à l'art. 6.3.2.

Le volume total des déblais, c'est-à-dire les volumes de dragage et de dérochement, a été déterminé selon les cas de calcul 3 à 5 et 10 du modèle mathématique pour différents mouillages. La distinction entre les volumes de dragage et de dérochement a été ensuite effectuée à l'aide des résultats de la Mission B.2 et des plans. Les volumes de dragage et de dérochement pour les cas 1a et 1b ont été calculés à partir des profils en travers et des niveaux d'eau déterminés dans le modèle mathématique.

8.2.2 Dragage et dérochement8.2.2.1 Volume de dragage et de dérochement sans tolérances

Le tableau 8.2.2.1 a) donne les volumes respectifs de dragage et de dérochement pour les différents tronçons.

a) Tronçon Leboudou-Doué - Vending (PK 244 à 489)

Dans ce tronçon, un dérochement devra avoir lieu dans le secteur du seuil de Dioudé Diabé. Beziukov avait également indiqué que les seuils de N'Gorel et d'Abdallah étaient rocheux. Mais, étant donné que des roches n'ont pas été constatées dans le cadre de la Mission B.2 et que l'étude d'Ivanov ne mentionne rien à ce sujet, des volumes de dérochement ne seront pas pris en considération pour ces seuils. La flotte de dragage sera cependant équipée de façon à permettre l'enlèvement des roches et cailloux constatés pendant l'exécution des travaux.

Une comparaison des cas de calcul 1a avec 3 et 1b avec 4 fait ressortir les incidences du barrage de Diama sur les volumes de déblais (voir tableau 8.2.2.1 a)). Le relèvement du niveau d'eau à Diama à +1,5 m IGN a pour conséquence que sur le tronçon Leboudou-Doué - Vending seuls environ 50 % des volumes relatifs à un mouillage à aménager de 1,4 m, et également de 1,9 m devraient être déblayés.

Les volumes supplémentaires nécessaires pour la réalisation d'un nouveau chenal navigable à Boghé sont récapitulés au tableau 8.2.2.1 b)).

b) Tronçon Vending - Matam (PK 489 à 637)

L'influence du barrage de Diama n'a, pour ce tronçon, plus été prise en considération car déjà dans le secteur aval de ce tronçon elle n'est que de l'ordre de quelques centimètres et donc pratiquement négligeable.

Des matériaux rocheux existent à Dâwalel, Kerr et Djowol. L'horizon rocheux est cependant si bas que des travaux de dérochement importants ne devront pas être effectués pour la réalisation du chenal navigable.

c) Tronçon Matam - Bakel (PK 637 à 816)

Sur ce tronçon, de plus amples travaux de dérochement devront être effectués à Diawara dans la mesure où la solution (1) indiquée à l'article 6.4.7.6 sera choisie. Les volumes de dérochement sont donnés au tableau 8.2.2.1 a). L'évaluation du dérochement à Diawara a été basée dès le début sur un chenal de 85 m de largeur et d'un mouillage d'au moins 2,4 m.

Les quantités en plus ou en moins qui résulteraient de l'exécution des variantes (2a) et (2b) sont indiquées au tableau 8.2.2.1 b).

Pour des raisons financières, le chenal existant actuellement à Bakel sera aménagé pour la navigation. Dans le cas où le nouveau chenal navigable proposé en alternative devrait être réalisé, il en résulterait les volumes de dragage supplémentaires indiqués au tableau 8.2.2.1 b).

d) Tronçon Bakel - Ambidédi (PK 816 à 905)

Sur ce tronçon les volumes de dragage sont les plus considérables. Selon la Mission B.2, d'importants travaux de dérochement ne sont pas escomptés.

e) Tronçon Ambidédi - Kayes (PK 905 à 948)

Les quantités de sable à draguer ne sont pas très importantes sur ce tronçon, à l'exception du seuil de Moussala. Pour un mouillage de 1,4 m, déjà environ 212 000 m³ de matériaux rocheux devront par contre être excavés. Pour un mouillage à aménager de 1,9 m 542 000 m³ et pour 2,4 m même 1 250 000 m³ devront être dérochés.

f) Tronçon St-Louis - Leboudou-Doué (PK 0 à 244)

Sur ce tronçon, des travaux de dragage ne sont pas nécessaires pour la circulation des bateaux fluviaux et convois prévus. Pour la circulation des caboteurs, d'après les documents disponibles il y a seulement un seuil à Bokhol (profondeur d'eau de 4,0 m) après la construction du barrage de Diama. Si des caboteurs d'un enfoncement de 4,5 m doivent y circuler, une profondeur d'eau de 5,0 m doit être aménagée. La circulation des caboteurs d'un enfoncement jusqu'à 3,5 m devrait être possible sans l'exécution de travaux de correction.

Tableau 8.2.2.1a) : Volume à draguer et à dérocher sans prise en considération des tolérances

N° du tronçon	Tronçon	PK	Volume à draguer et à dérocher en 1000 m ³ pour un mouillage à aménager de									
			1,4 m, sans RN		1,9 m, sans RN		1,4 m, RN + 1,5 m IGN		1,9 m, RN+1,5m IGN		2,4 m, RN + 1,5 m IGN	
			cas 1 a		cas 1 b		cas 3		cas 4		cas 5	
			S	R	S	R	S	R	S	R	S	R
1	Leboudou-Doué - Vending	244-489	234	9	640	24	123	7	335	21	1 335	66
2	Vending - Matam	489-637	-	-	72	7	-	-	72	7	520	14
3	Matam - Bakel	637-816	79	33	268	33	79	33	268	33	1 160	33
4	Bakel-Ambidédi	816-905	160	12	492	22	160	12	492	22	1 422	42
5	Ambidédi-Kayes	905-948	31	212	58	542	31	212	58	542	188	1 250
-	Fleuve Sénégal de Leboudou-Doué à Kayes	244-948	504	266	1 530	628	393	264	1 225	625	4 625	1 405
			770		2 158		657		1 850		6 030	

RN = Retenue normale du barrage de Diama
S = Sable
R = Roche

Tableau 8.2.2.1 b): Volumes de dragage pour les alternatives

N° d'ordre	Emplacement et alternatives	Volumes en plus ou en moins en m ³ par rapport à la proposition principale (Tableau 8.2.2.1 a) pour un mouillage à aménager de					
		1,4 m		1,9 m		2,4 m	
		S	R	S	R	S	R
1	Boghé	+ 74 000	-	+ 84 000	-	+ 87 000	-
2	Diawara Alternative 2 a (bref contournement)	+ 27 000	- 33 000	+ 49 000	- 33 000	+ 74 000	- 33 000
	Alternative 2 b (contournement allongé)	+194 000	- 33 000	+308 000	- 33 000	+440 000	- 33 000
3	Bakel Nouveau chenal navi- gable	+518 000	-	+583 000	-	+642 000	-

S = Sable

R = Roche

8.2.2.2 Volumes de dragage et de dérochement y compris les tolérances

Les volumes de dragage indiqués aux tableaux 8.2.2.1 a) et b) ne comprennent pas les volumes supplémentaires résultant des tolérances d'exécution. Etant donné que le mouillage requis du chenal doit être garanti, seules des tolérances positives peuvent être admises. Conformément aux expériences acquises d'une façon générale, ces tolérances sont utilisées et souvent dépassées par les entreprises.

En raison de conditions analogues, les tolérances de dragage suivantes sont admises dans le cas présent:

- pour la profondeur: 0,3 m
- pour la largeur: 1,0 m des deux côtés.

Les volumes supplémentaires dus aux tolérances de dragage inévitables sont pris en considération par le facteur de majoration suivant:

$$f_1 = \frac{T_d + 0,3}{T_d} \quad (T_d = \text{Profondeur du dragage})$$

La surlargeur est prise en considération par un supplément de 5 %. Les volumes à draguer sont déterminés donc à partir des volumes de sable (V_o) indiqués aux tableaux 8.2.2.1 a) et b) et par la formule:

$$V = 1,05 \cdot \frac{T_d + 0,3}{T_d} \cdot V_o$$

Pour le dérochement à Diawara, une tolérance de 10 % est fixée.

Pour le dérochement - des roches se trouvant de façon isolée sous le sable - des tolérances des quantités de roche ne sont pas prises en considération. Ceci est justifié étant donné que conformément à l'article 10.2, le coût de dragage est fixé pour ces travaux et que des tolérances y relatives sont déjà comprises dans les quantités de sable.

Pour le tronçon rocheux entre Ambicédi et Kayes, les tolérances à escompter sont faibles à cause de l'exécution du travail à sec et les coûts supplémentaires en résultant sont considérés dans les prix unitaires indiqués.

Les volumes de dragage et de dérochement, y compris les tolérances, sont indiqués au tableau 8.2.2.2 a). Pour les alternatives, les quantités en plus ou en moins sont récapitulées au tableau 8.2.2.2 b).

Le tableau 8.2.2.2 c) donne pour les différents tronçons les quantités de dragage et de dérochement par km de longueur de fleuve.

Tab. 8.2.2.2 a) Volume à déblayer y compris les tolérances

N°	Tronçon	PK	Volume en 1000 m ³ à draguer et à dérocher, y compris les tolérances, pour un mouillage à aménager de									
			1,4 m, sans RN		1,9 m, sans RN		1,4 m, RN +1,5 m IGN		1,9 m, RN +1,5 m IGN		2,4 m, RN +1,5 m IGN	
			cas 1a		cas 1b		cas 3		cas 4		cas 5	
			S	R	S	R	S	R	S	R	S	R
1	Leboudou-Doué - Vending	244-489	393	9	928	24	206	7	486	21	2 032	66
2	Vending - Matam	489-637	-	-	121	7	-	-	121	7	828	14
3	Matam - Bakel	637-816	133	37	401	37	133	37	401	37	1 780	37
4	Bakel - Ambidédi	816-905	269	12	726	22	269	12	726	22	2 079	42
5	Ambidédi - Kayes	905-948	52	212	88	542	52	212	88	542	273	1 250
	Total	244-948	847	270	2 264	632	660	268	1 822	629	6 992	1 409

RN = Retenue normale du barrage de Diama

S = Sable

R = Roche

Tab. 8.2.2.2 b) Volume à déblayer pour les alternatives y compris les tolérances

N°	Localité et alternative	Volumes en plus et en moins à draguer et à dérocher, y compris les tolérances, indiqués en 1000 m ³ , pour un mouillage de					
		1,4 m		1,9 m		2,4	
		S	R	S	R	S	R
1	Boghé	+92	-	+97	-	+100	-
2	Diawara Alternative 2a (bref contournement)	+35	-37	+64	-37	+91	-37
	Diawara Alternative 2b (contournement allongé)	+236	-37	+367	-37	+515	-37
3	Bakel (nouveau chenal navigable)	+543	-	+612	-	+655	-

S = Sable

R = Roche

Tab. 8.2.2.2 c) Volume de dragage et de dérochement en m³/km

N ^o	Tronçon	PK	Volume en m ³ /km à draguer et à dérocher, y compris les tolérances pour un mouillage à aménager de									
			1,4 m, cas 1a		1,9 m, cas 1b		1,4 m, cas 3		1,9 m, cas 4		2,4 m, cas 5	
			S	R	S	R	S	R	S	R	S	R
1	Leboudou-Doué - Vending	244-489	1604	37	3788	98	841	29	1984	86	8294	269
2	Vending - Matam	489-637	-	-	818	47	-	-	818	47	5595	95
3	Matam - Bakel	637-816	743	207	2240	207	743	207	2240	207	9944	207
4	Bakel - Ambidédi	816-905	3022	135	8157	247	3022	135	8157	247	23360	472
5	Ambidédi - Kayes	905-948	1209	4930	2047	12605	1209	4930	2047	12605	6349	29070
6	Moyenne pour le tronçon Leboudou-Doué - Kayes	244-948	1203	384	3216	898	938	381	2588	893	9932	2001

S = Sable

R = Roche

8.2.2.3 Classification des volumes de dragage selon les différentes catégories de prix

Le rendement d'une drague dépend dans une large mesure de l'épaisseur de déblaieement. Le rendement maximal des dragues à godets de 300 l est atteint lors d'une épaisseur de déblaieement E_d d'au moins 1,0 m à 1,5 m. Conformément à la pratique, les rendements pour de plus faibles épaisseurs sont les suivants:

- $E_d \geq 1,0 \text{ m} \quad : \eta = 1,0$
- $E_d = 0,5 \text{ à } 1,0 \text{ m} : \eta = 0,8$
- $E_d = 0,2 \text{ à } 0,5 \text{ m} : \eta = 0,6.$

Etant donné que la réduction du rendement se traduit directement dans le prix, les volumes de dragage indiqués au tableau 8.2.2.2 a) sont divisés comme suit en 3 catégories de prix:

- Catégorie de prix I : Profondeur de dragage: 0,2 à 0,5 m
- Catégorie de prix II : Profondeur de dragage: 0,5 à 1,0 m
- Catégorie de prix III: Profondeur de dragage: $\geq 1,0 \text{ m}.$

La répartition des volumes de dragage des différents tronçons entre les trois catégories de prix est indiquée au tableau 8.2.2.3.

Tab. 8.2.2.3: Volume de dragage pour les différentes catégories de prix

Mouillage à aménager	Volume à draguer en 1000 m ³								
	1,4 m, cas 3			1,9 m, cas 4			2,4 m, cas 5		
Catégorie de prix	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Leboudou-Doué - Vending	206	-	-	151	335	-	1 323	245	464
Vending - Matam	-	-	-	121	-	-	632	196	-
Matam - Bakel	133	-	-	185	216	-	1 181	300	299
Bakel - Ambidédi	269	-	-	289	437	-	1 004	470	605
Ambidédi - Kayes	52	-	-	46	42	-	121	74	78
Total par caté- gorie de prix	660	-	-	792	1 030	-	4 261	1 285	1 446
Total pour le mouillage à aménager	660			1 822			6 992		

8.2.2.4 Comparaison des volumes de dragage des différentes études

Une comparaison des volumes déterminés par Beziukov avec ceux déterminés par le Groupement LDE n'est pas possible, car

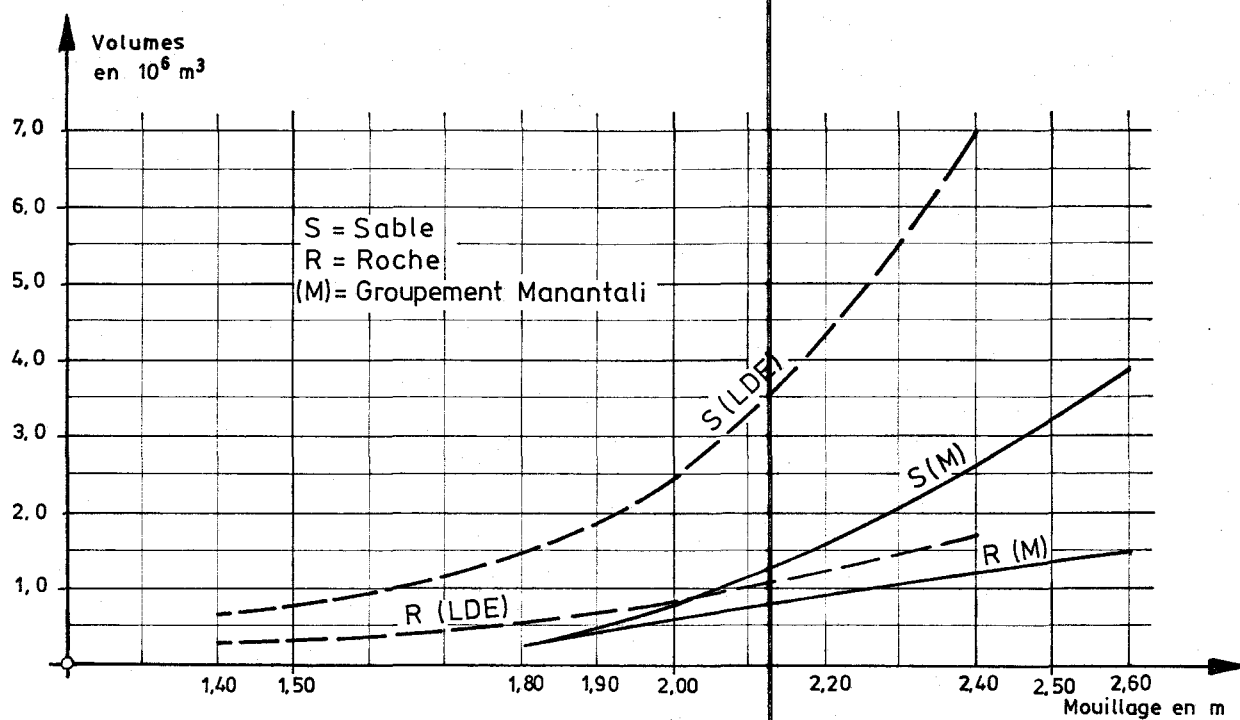
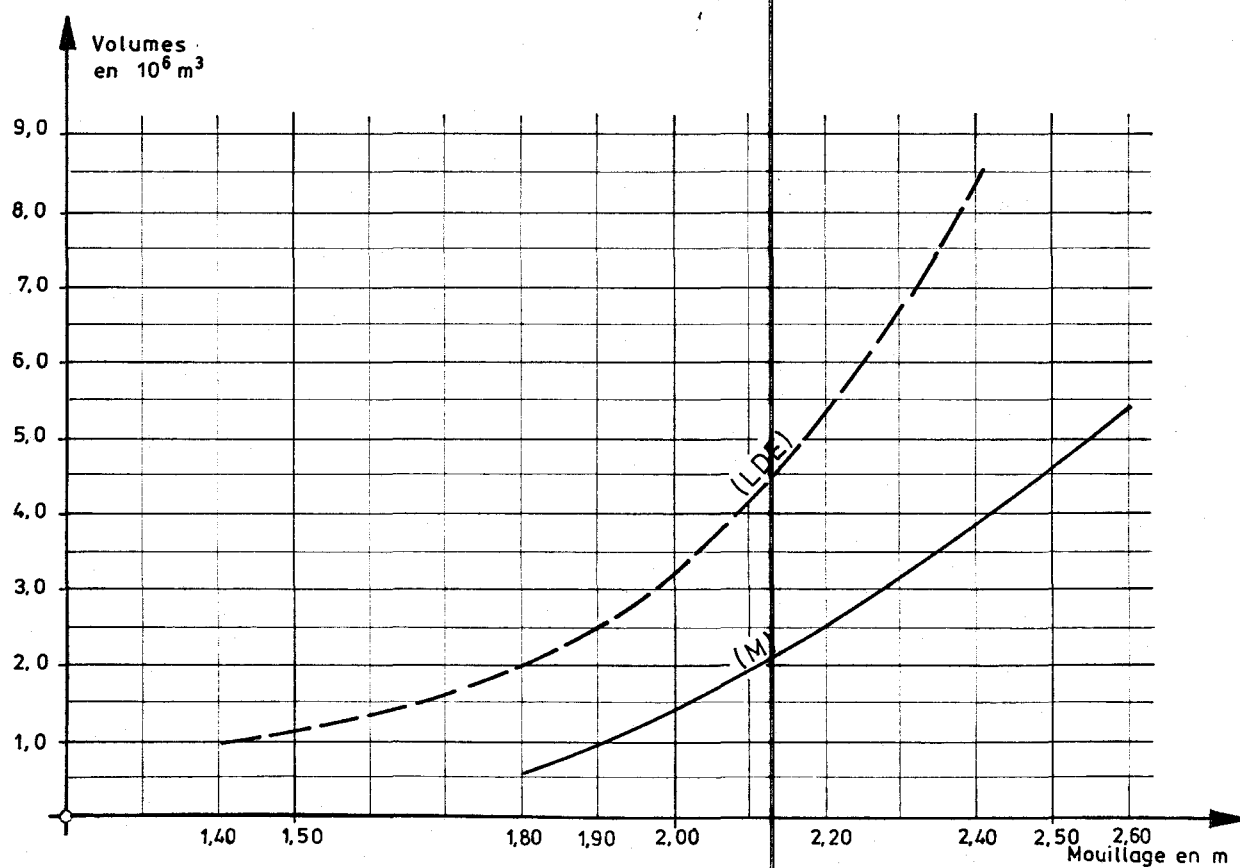
- le chenal fixé par Beziukov n'a que 20 m de largeur,
- le pied de pilote n'a pas été indiqué,
- les volumes ne sont estimés qu'approximativement.

Une comparaison des volumes déterminés par le Groupement Manantali et le Groupement LDE est par contre significative (voir tableau 8.2.2.4).

Tableau 8.2.2.4: Comparaison des volumes de déblaiement

	Groupement Manantali				Groupement LDE		
Mouillage à aménager	1,8 m	2,2 m	2,6 m		1,4 m	1,9 m	2,4 m
Largeur du chenal	≥ 60 m				≥ 55 m		
Volumes de dragage en 1000 m ³	280	1640	3916		660	1822	6992
Volumes de déroctage en 1000 m ³	250	895	1484		268	629	1409
Total en 1000 m ³	530	2535	5400		928	2451	8401

La figure 8.2.2.4 a) donne une comparaison des volumes de dragage et de dérochement et la figure 8.2.2.4 b) la totalité des volumes.

Fig. 8.2.2.4a) Volume de dragage et de dérochementFig. 8.2.2.4b) Total des volumes de déblaiement

La comparaison montre que les volumes totaux des déblais escomptés par le Groupement Manantali et LDE diffèrent en partie et aussi en totalité considérablement l'un de l'autre. Les différences s'expliquent par les faits suivants:

- Le Groupement Manantali n'a possédé ni de relevé topographique assez exact ni de reconnaissance du sol.
- Le Groupement Manantali n'a pas calculé les hauteurs des niveaux d'eau dans un modèle mathématique.
- Le Groupement Manantali n'a pas pris en considération de majoration pour l'exactitude des relevés topographiques et des calculs, ni pour la sécurité de la navigation ($\Sigma \Delta T = 0,30$ à $0,45$ m) et
- Les indications de LDE comprennent des tolérances de dragage d'environ $0,3$ m en profondeur et de $1,0$ m sur les côtés.

Tableau 8.2.3.1 a): Besoin en matériaux pour les épis en enrochements

Hauteur de l'épi en m	Besoin en matériaux et ampleur des travaux			
	Secteur normal	Tête	Enracinement	Déblaiement
1,5	7,9 m ³ /m.c.	80 m ³	80 m ³	35 m ³
2,0	13,0 m ³ /m.c.	130 m ³	130 m ³	55 m ³
2,5	19,4 m ³ /m.c.	190 m ³	190 m ³	85 m ³

b) Panneaux de surface

Deux solutions sont étudiées pour la protection du pied. La solution A prévoit l'enracinement du pied dans le fond du chenal alors que la solution B prévoit l'application du pied directement sur le fond du chenal. Le tableau 8.2.3.1 b) donne une comparaison des besoins en matériaux et de l'ampleur des travaux pour ces solutions.

Tableau 8.2.3.1 b): Besoin en matériaux et l'ampleur des travaux pour la protection du pied

	Solution A	Solution B
Déblaiement	9,6 m ³ /m.c.	-
Enrochement	3,4 m ³ /m.c.	4,0 m ³ /m.c.
Gravelage	6,3 m ³ /m.c.	-

Etant donné que les besoins en matériaux et l'ampleur des travaux de la solution A sont bien plus importants, la solution B doit être généralement exécutée. L'exécution de la solution A n'est prévue que dans les secteurs ayant une forte érosion du fond du chenal.

Pour le panneau de surface lui-même, $1,3 \text{ m}^3/\text{m.c.}$ de matériaux par mètre de hauteur de berge à protéger est nécessaire pour une inclinaison du talus de 1:3 et pour une épaisseur de la couche de 40 cm. Pour 1 m.c. de longueur de fleuve, avec une protection du pied selon la solution B, le volume de matériaux en m^3 est de:

$$V = 5,0 + 1,3 \cdot h.$$

La berge devra être adaptée auparavant à l'inclinaison du panneau de surface par un remblaiement ou déblaiement en terre. Les quantités de sol requises à cet effet dépendent de l'inclinaison naturelle des rives et de la hauteur à protéger.

Pour une inclinaison à réaliser de 1:3 et une inclinaison naturelle de 1:n, avec $n < 3$, le volume du remblai en terre est de:

$$V = (1,5 - \frac{n}{2}) \cdot h^2 + 2 \cdot h \quad (n < 3).$$

Dans la mesure où l'inclinaison du talus naturel est inférieure à 1:3, le volume de déblaiement est de:

$$V = (\frac{n}{2} - 1,5) \cdot h^2, \quad (n > 3).$$

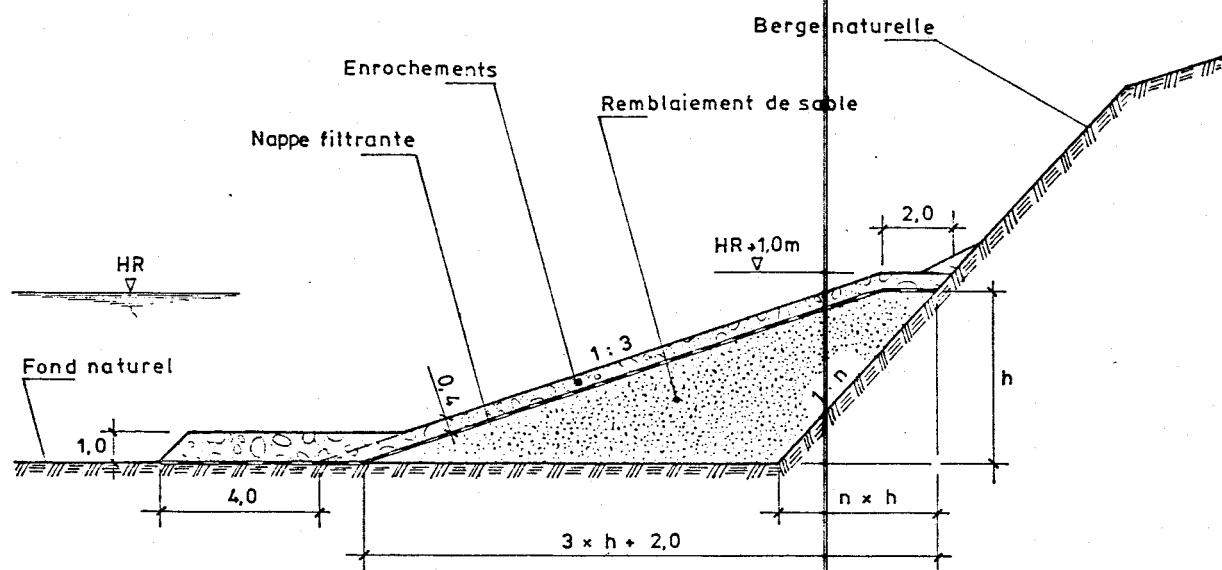


Fig. 8.2.3.1a) Panneau de surface pour une berge

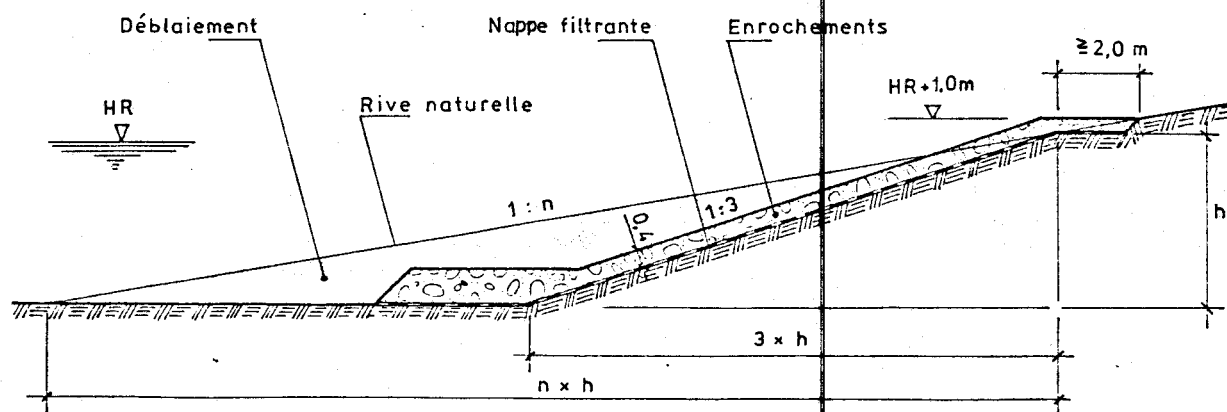


Fig. 8.2.3.1b) Panneau de surface pour une rive plate

Tableau 8.2.3.1 c) : Besoins en matériaux pour les pan-
neaux de surface

Hauteur de la berge à protéger	Volume en $m^3/m.c.$
1,5	7,0
2,0	7,6
2,5	8,3
3,0	8,9
3,5	9,6
4,0	10,2
4,5	10,9
5,0	11,5

c) Digues

Pour les digues en enrochements, les besoins en matériaux en $m^3/m.c.$ sont, en fonction de la hauteur, pour une largeur de la crête de 1,5 m et des inclinaisons du talus des deux côtés de 1,3 de:

$$V = 1,5 h + 3,0 h^2.$$

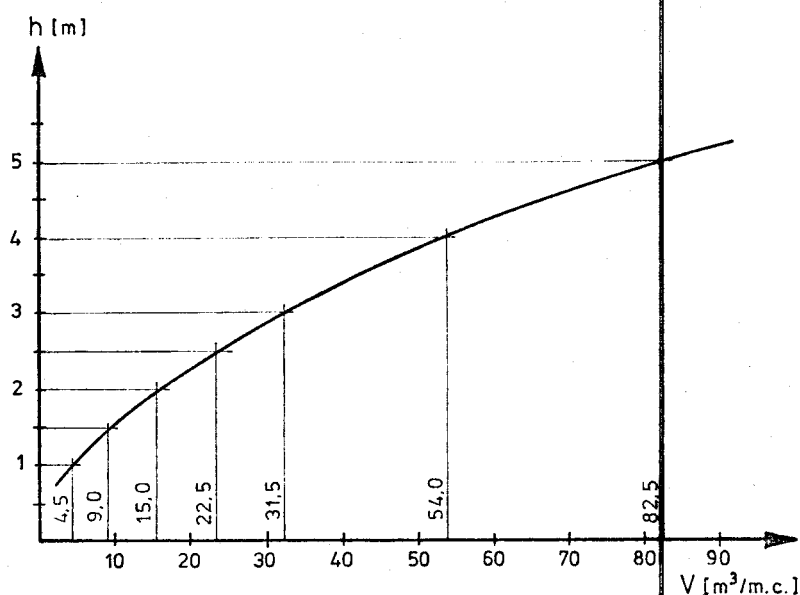


Figure 8.2.3.2 c): Besoins en matériaux pour les digues

8.2.3.2 Besoins en matériaux pour les différents seuils

Conformément aux données du tableau 6.4.11, des ouvrages de correction ont été projetés pour différents secteurs de seuils. Ces ouvrages ne doivent pas remplacer les travaux de dragage et de dérochement, mais réduire les travaux d'entretien ultérieurs.

Le tableau 8.2.3.2 donne les besoins en matériaux pour les épis, digues et panneaux de surface. Les volumes ont été calculés pour la première phase d'aménagement au cours de laquelle seule une partie des ouvrages de correction, par ex. un épi sur deux ou sur trois, sera réalisée.

Les volumes de déblaiement indiqués représentent uniquement le dragage nécessaire pour la réalisation des ouvrages de correction.

Les dragages pour la réalisation du chenal navigable sont étudiés à l'art. 8.2.2.

Tableau 8.2.3.2 Besoin en matériaux pour les ouvrages
de correction et volume de dragage

Nom du seuil	Empierrements en m ³	Nappes filtrantes en m ²	Déblaiement en m ³
Dioudé Diabé	33 800	27 800	6 700
N'Guidjilone	17 900	8 100	600
Koundél	4 500	3 800	1 000
Goumal	48 400	58 200	4 000
Koungani	31 000	21 200	1 000
Goutioubé	80 700	74 100	30 300
Khabou	102 600	73 000	3 500
Digokori	71 800	74 800	3 300
Somone	64 300	40 000	1 600
Total	455 000	380 000	52 000

8.2.3.3

Solutions alternatives

Des variantes au projet principal du chenal navigable ont été élaborées pour quelques secteurs de seuils. Le tableau 8.2.3.3 indique les volumes d'empierrements et de nappes filtrantes requis pour ces variantes.

Tableau 8.2.3.3 : Besoins en matériaux pour les variantes

Seuil/Variante	Empierrements en m ³	Nappes filtrantes en m ²
Boghé	27 500	20 000
Diawara/Solution 2a	21 000	21 000
Diawara/Solution 2b	57 000	7 500
Bakel	42 000	-

9. Matériel à mettre en service et déroulement des travaux

9.1 Généralités

Les travaux qui devront être exécutés, sont caractérisés par le fait qu'ils sont répartis sur une longueur de fleuve d'environ 600 km, et que le développement de l'infrastructure de cette région est faible jusqu'à présent. Ceci est notamment le cas pour les moyens de communication.

Afin de tenir compte de ces données,

- les travaux à exécuter simultanément devront être concentrés localement,
- au moins deux engins devront être mis en service pour chaque opération de travail, de sorte que les travaux ne doivent pas être totalement suspendus en cas de panne d'un engin,
- les engins devront être si possible du même type afin de simplifier le stockage de pièces de rechange,
- l'approvisionnement doit être garanti, et toutes les mesures requises pour un chantier autonome devront être prises.

En outre le débit du fleuve Sénégal est très important pour le planning des travaux, car celui-ci a une incidence considérable sur les coûts de construction.

La détermination du matériel à mettre en service est basée sur les données suivantes:

- Le chenal navigable entre St-Louis et Kayes doit être réalisé avec un mouillage à aménager de 1,4, 1,9 ou de 2,4 m.
- Les dragages seront effectués indépendamment des travaux de dérochement entre Ambidédi et Kayes.

- La flotte de dragage sera équipée de façon à pouvoir effectuer également d'éventuels travaux de dérochement.
- Les travaux de dragage devront tenir compte de la progression des travaux et de la mise en service du barrage de Manantali de sorte qu'ils commencent au moment où les débits de la phase transitoire PT 1, peuvent être fournis par le barrage pendant toute l'année ou presque.
- Les travaux de dérochement entre Ambidédi et Kayes seront effectués à sec à partir de la rive. Les travaux devront donc être achevés avant que les débits de régularisation soient fournis par le barrage de Manantali.

9.2 Matériel à mettre en service

9.2.1. Matériel de dragage

Dans le secteur du fleuve entre Leboudou-Doué et Ambidédi, du sable et du sable silteux à argileux doivent être dragués. A l'exception de Diawara, on ne rencontre des cailloux et des matériaux rocheux que sporadiquement.

Des dragues à godets devraient donc être utilisées étant donné leur grande robustesse, et elles devraient convenir non seulement au dragage des sols à grains fins et grossiers, mais aussi à celui des roches décroctées. Pour l'enlèvement des roches compactes et de gros morceaux de roches, le matériel suivant devra être prévu en supplément:

- une drague à benne preneuse et/ou une rétrocaveuse sur ponton ainsi que
- des perforatrices pour roches avec compresseurs, également appropriées aux forages sous l'eau.

Les matériaux brisés peuvent être enlevés avec la drague à benne preneuse ou la rétrocaveuse et, dans le cas de quantités importantes, avec la drague à godets.

Les matériaux à grains fins ne peuvent généralement pas être déversés dans le lit du fleuve. En plus une drague refouleuse est donc mise en service pour le vidage des chalands. Les graviers, les cailloux et les pierres devront être déposés à proximité des berges en vue de leur réutilisation ultérieure.

Le tableau 9.2.1 indique le matériel de la flotte de dragage nécessaire pour un mouillage à aménager de 1,4 à 2,4 m.

En ce qui concerne le rendement d'une drague à godets en fonction de l'épaisseur de dragage, prière de se reporter à l'article 8.2.2.3.

Tableau 9.2.1 : Flotte de dragage

N°	Nombre	Engin
1	2 à 3	Dragues à godets, capacité des godets: env. 300 l
2	1	Drague suceuse-refouleuse avec conduite de refoulement, capacité: 500 m ³ /h
3	5 à 6	Chaland automoteurs, capacité d'env. 250 m ³
4	1	Chaland à pont ou ponton
5	3 à 4	Remorqueurs
6	1	Chaland à pont automoteur, avec drague à godets ou rétrocaveuse
7	-	Perforatrices pour roches avec compresseurs
8	2	Barcasses
9	2	Bateaux de sondage
10	1	Vedette-atelier
11	2 à 3	Bateaux-citernes, automoteurs
12	2 à 3	Bateaux d'habitation
13	1	Bulldozer à chenilles
14	1	Chargeuse sur pneus
15	2	Camions
16	1	Unimog
17	1	Landrover
18	1	Voiture particulière
19	-	Divers petits appareils

9.2.2 Dérochement9.2.2.1 Diawara

La percée de la presqu'île et le dérochement partiel de l'îlot peuvent être effectués avec le matériel approprié indiqué au tableau 9.2.1. Dans la mesure du possible, le dérochement devrait avoir lieu à sec.

9.2.2.2 Tronçon Ambidédi - Kayes

Le chenal navigable doit être réalisé à partir de la rive dans ce tronçon. D'après les expériences générales, les coûts pour le dérochement réalisé sous l'eau sont 2 à 3 fois plus élevés que ceux pour le dérochement à sec. Ceci est dû:

- à l'emploi d'un matériel flottant cher,
- à la longue durée requise pour les travaux réalisés sans contrôle visuel direct, entraînant ainsi des travaux supplémentaires,
- à la plus forte consommation en explosifs et carburants.

Dans le secteur des seuils rocheux, entre Ambidédi et Kayes, le lit rocheux doit être approfondi de 0,2 à 0,8 m pour un mouillage à aménager de 1,9 m. La surface de la roche est partiellement fissurée et désagrégée de sorte qu'elle est inégale.

Dans ce cas, un minage est inapproprié et cher, car il faut forer bien au-dessous du fond. Le déroctage au trépan peut être ici envisagé, et est en outre plus précis.

Les études suivantes seront donc basées sur la méthode de déroctage au trépan car, en cas d'une mise en service de rétrocaveuses appropriées, une grande partie de la roche fissurée peut être déblayée à la drague. Il convient cependant de mentionner que le choix de la méthode la plus rentable devrait être laissé aux soumissionnaires.

Etant donné que la surface de la roche est très crevassée, le chenal navigable a été tracé dans la partie rocheuse le plus près possible de la berge. Ceci permet d'éviter de longues voies d'accès au chenal qui devraient être réalisées par remplissage des crevasses et des trous.

Des rétrocaveuses seront utilisées pour l'extraction et le chargement des roches. Celles-ci peuvent être équipées d'un trépan de déroctage pneumatique et d'un compresseur au lieu du godet rétro. Le même engin de base peut donc être utilisé pour le travail au trépan et pour le chargement. Ceci simplifie le stockage des pièces de rechange et assure une plus grande flexibilité au chantier.

Les matériaux rocheux excavés seront utilisés partiellement pour le remplissage des crevasses et creux afin de réaliser une surface de travail plate pour les engins. Les matériaux restants devront être transportés par des camions-bennes et être déposés près des berges en vue de leur réutilisation.

Le tableau 9.2.2 indique la liste du matériel à mettre en service pour les travaux de dérochement. Ce tableau ne donne cependant que des valeurs indicatives. Au lieu des types de drague indiqués, de plus grands engins et en revanche des engins d'un plus petit nombre peuvent également être utilisés. Le rendement et les coûts ne subiront cependant pas de modifications notables.

Tableau 9.2.2: Engins pour les travaux de dérochement

N°	Nombre	Engin
1	12	Machines d'excavation hydraulique avec marteau de déroctage et compresseur, 130 à 180 ch
2	12	Rétrocaveuses, 130 ch
3	2	Dragues à benne preneuse, 130 ch
4	10	Camions-bennes, 20 t
5	1	Bulldozer, 380 ch
6	1	Chargeuse sur pneus avec chaînes de protection, 130 ch
7	2	Camions, 6,5 t
8	3	Camions-citernes, 15 t
9	1	Unimog
10	2	Landrover / Voiture particulière
11	1	Groupe électrogène
12	-	Atelier avec dépôt d'hydrocarbures
13	-	Logements et bureaux
14	-	Engins et accessoires divers

9.2.3 Exécution des travaux et matériel pour la construction d'ouvrages de correction

Le choix du matériel est essentiellement déterminé par la date d'exécution des travaux. Si les ouvrages sont construits avant la mise en service du barrage de Manantali, une grande partie de leur exécution pourra avoir lieu à sec.

9.2.3.1 Exécution à sec

La construction à sec d'épis en enrochement et d'autres ouvrages de correction a pour avantage l'utilisation de matériel simple et donc meilleur marché pour les travaux. Cette solution présente cependant les désavantages suivants:

- Les pierres nécessaires devront être amenées de loin par voie terrestre. Il en résulte des coûts de transport très élevés qui sont, selon la distance de transport, jusqu'à 2,5 fois plus élevés que pour le transport par bateau.
- Les voies d'accès aux différents chantiers situés sur le fleuve Sénégal devront être réalisées en grande partie et ceci entraînera des frais accessoires considérables.

Les mêmes types d'engins sont essentiellement nécessaires pour la construction des ouvrages et le dérochement à sec.

9.2.3.2 Mise en oeuvre avec du matériel flottant

Dans la mesure où les épis en enrochements et les autres ouvrages doivent être exécutés avec du matériel flottant, ceci n'est généralement possible que si le débit de régularisation est mis à disposition par le barrage de Manantali. Cette méthode d'exécution présente les avantages suivants:

- L'utilisation de la voie d'eau pour le transport des pierres à un prix plus avantageux.
- Les matériaux peuvent être transportés directement par des bateaux jusqu'au chantier.
- Les matériaux déblayés du chenal navigable entre Ambidédi et Kayes peuvent être utilisés de sorte que les coûts de leur extraction sont supprimés.

Cette méthode d'exécution nécessite le matériel suivant:

- Camions pour le transport des pierres de la carrière ou bien du dépôt intermédiaire, au lieu de transbordement.
- Equipement pour le transbordement dans la mesure où la préférence n'est pas donnée au transbordement manuel.
- Dragues à benne preneuse ou rétrocaveuses sur ponton pour la réalisation du fond et des talus de berge requis.
- Dragues à benne preneuse sur ponton pour la mise en oeuvre des pierres.
- Chalands automoteurs ou avec remorqueur pour le transport des matériaux rocheux.
- Chalands à pont.

Etant donné que les volumes dérochés entre Ambidédi et Kayes ne suffisent pas pour les ouvrages en empierrements prévus, une carrière devra être exploitée si possible à proximité immédiate du fleuve. Celle-ci devrait être assez grande de façon à pouvoir être utilisée ultérieurement également par la Direction de la Voie Navigable.

9.2.3.3 Epis en sacs en matière plastique remplis de sable

Si les épis doivent être réalisés en même temps ou presque que les travaux de dragage, des épis en empierrement ne pourront pas être pris en considération pour des raisons financières. Seuls des épis constitués de sacs en matière plastique remplis de sable pourront être alors réalisés. Etant donné que ces sacs peuvent, lors des crues, être facilement endommagés par des bateaux qui les heurtent par mégarde, la réalisation de cette sorte d'épi devrait être limitée au strict minimum. En outre, la tête d'épi devrait absolument être protégée ultérieurement par un enrochement.

De plus, un épi sur deux ou trois devrait être réalisé dans les premiers temps alors que les épis intermédiaires seront réalisés ultérieurement en épis en enrochements. Ceci permettra une protection des épis en sacs et garantira également l'effet du champ d'épi en cas d'endommagement des épis en matière plastique.

Le matériel suivant sera essentiellement nécessaire pour la réalisation de ces épis constitués de grands sacs en matière plastique:

- Ponton avec dame à main pour le battage des pieux,
- Installation pour le remplissage des sacs,
- Dragues à benne preneuse,
- Remorqueurs.

Un calcul approximatif a en outre montré que les épis en sacs sont moins chers que les épis en empierrements uniquement dans le tronçon aval, c'est-à-dire jusqu'au PK 450 environ.

9.2.4

Remblaiement des affouillements

Un remblaiement des affouillements n'est tout d'abord pas prévu, étant donné que les matériaux de remblaiement généralement fins peuvent être à nouveau entraînés par la crue et déposés aux endroits ayant un faible mouillage. Si des matériaux grossiers sont également dragués lors de l'exécution des travaux, un remblaiement des affouillements devra être décidé selon chaque cas.

9.3

Planning d'exécution des travaux

Le planning à la page 9 - 13 donne un aperçu du déroulement des travaux.

9.3.1

Dragages

Pour un mouillage à aménager de 1,9 m, l'exécution des travaux de dragage nécessite 16 à 24 mois suivant que trois ou deux dragues à godets sont utilisées.

Les travaux devront être entrepris lorsque le barrage de Manantali garantira le débit requis pour le dragage.

Pour un mouillage à aménager de 1,4 m, la durée de construction est d'environ 10 à 12 mois en cas d'utilisation de deux dragues. Pour un mouillage à aménager de 2,4 m, la durée d'exécution varie entre 55 et 60 mois, si trois dragues sont mises en service.

9.3.2 Dérochement

Le dérochement entre Ambidédi et Kayes devrait être achevé avant la mise en service du barrage de Manantali. Etant donné que la réalisation d'un chenal navigable de 1,9 m de mouillage durera environ 17 à 20 mois, les travaux devront être entrepris au moins 24 mois avant la mise en service du barrage. Les travaux devront être planifiés de sorte que l'exécution puisse être entreprise immédiatement après la crue.

9.3.3 Ouvrages de correction

En raison des aspects économiques, les ouvrages de correction devront être réalisés après les travaux de dragage, afin de pouvoir utiliser la voie d'eau comme moyen de transport de pierres. Seul le seuil de Dioudé Diabé pourrait être aménagé par des épis au cours des travaux de dragage, si des épis en sacs en matière plastique remplis de sable sont réalisés au lieu des épis en empierrements.

Planning général des travaux pour l'aménagement du chenal navigable de 19m de mouillage

Travaux		1ère année				2ème année				3ème année				4ème année				5ème année				6ème année				7ème année				8ème année			
Dérochement Ambidédi - Kayes	Installation des chantiers																																
	Dérochement																																
	Dégagement des chantiers																																
Leboudou-Doué - Kayes 2 Dragues	Installation des chantiers																																
	Dragage																																
	Travaux d'entretien																																
	Dégagement des chantiers																																
	Installation des chantiers																																
Dragage 3 Dragues	Dragage																																
	Travaux d'entretien																																
	Dégagement des chantiers																																
Ouvrages	Installation des chantiers																																
	Travaux de construction																																
	Dégagement des chantiers																																

Mise en exploitation
partielle du barrage
de Manantali

10. Coûts de construction

10.1 Coûts de dragage

Les prix unitaires sont déterminés essentiellement par:

- les mouillages à aménager
- le matériel mis en service.

Les prix unitaires indiqués dans la Mission A.1.7 ont été escomptés sous l'aspect qu'ils dépendent:

- du volume de dragage et
- du nombre de dragues mises en service.

Les prix unitaires sont représentés à la figure 10.1 en fonction du volume de dragage. Pour les volumes de dragage déterminés à l'art. 8, il en résulte les prix unitaires et coûts indiqués au tableau 10.1 b).

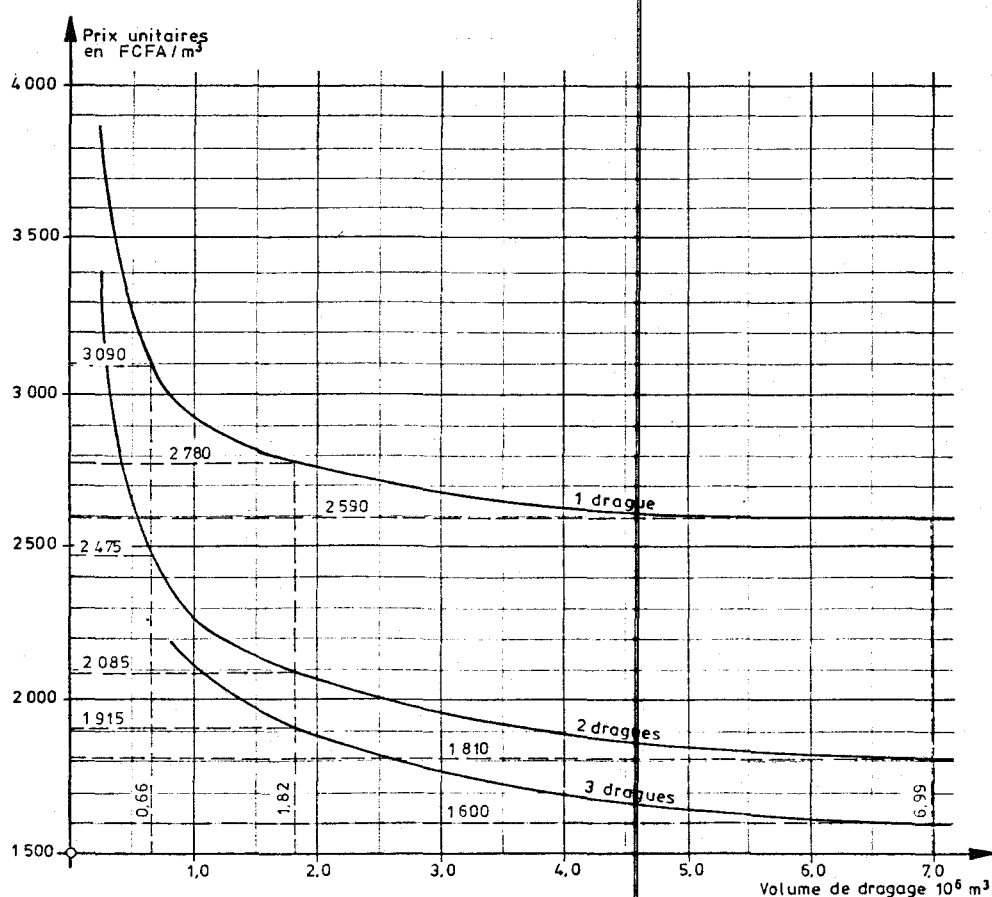


Fig. 10.1 Prix unitaires pour le dragage

Les prix unitaires ne comprennent pas les coûts pour:

- l'installation et le dégagement des chantiers, ainsi que
- les travaux secondaires et les imprévus.

Les coûts pour les travaux secondaires et les imprévus sont fixés à environ 10 % des coûts de construction.

Les coûts pour l'installation et le dégagement des chantiers sont calculés sur la base des besoins en matériel et en personnel prévus. Ces coûts comprennent:

- le transport en Europe jusqu'au port maritime et inversement,
- les droits de transbordement en Europe et au Sénégal,
- le fret maritime, y compris les assurances pour le transport aller et retour,
- les frais de transport jusqu'à St-Louis et inversement,
- les frais pour le montage et le démontage du matériel,
- les frais de mise à disposition du matériel pour la durée du transport, du montage et du démontage.

Les différents coûts sont récapitulés au tableau 10.1 a).

Tableau 10.1 a): Récapitulation des coûts d'installation
et de dégagement des chantiers

Nombre de dragues	Coûts en millions de FCFA en fonction de la flotte de dragage			
	1		2	3
Transport en Europe	12		15	19
Fret maritime, y compris le chargement et déchargement	90		125	167
Assurance	5		6	8
Taxe du port de Dakar	12		16	21
Transport Dakar - St-Louis	25		32	42
Total transport aller	144		194	257
Total transport retour	144		194	257
Frais de matériel pour le transport, le montage et démontage	42		56	77
Frais de personnel	38		44	53
Total	368		488	644
Total plus 36 % pour frais généraux de l'entrepreneur	500		664	876

Tableau 10.1 b) : Coûts pour le dragage

Profondeur à aménager en m	Coûts en millions de FCFA pour							
	1,4		1,9			2,4		
Nombre de dragues	1	2	1	2	3	1	2	3
Prix unitaire en FCFA/m ³	3 090	2 475	2 780	2 085	1 915	2 590	1 810	1 600
Leboudou-Doué - Vending	637	510	1 351	1 013	931	5 263	3 678	3 251
Vending - Matam	-	-	336	252	232	2 145	1 499	1 325
Matam - Bakel	411	329	1 115	836	768	4 610	3 222	2 848
Bakel - Ambidédi	831	666	2 018	1 514	1 390	5 385	3 763	3 326
Ambidédi - Kayes	161	129	245	183	169	707	494	347
Total	2 040	1 634	5 065	3 798	3 490	18 110	12 656	11 187
Installation et dégagement du chantier	500	664	500	664	876	500	664	876
Total intermédiaire	2 540	2 298	5 565	4 462	4 366	18 610	13 320	12 063
Travaux secondaires et imprévus	260	202	535	438	434	1 790	1 280	1 137
Total général en M.FCFA	2 800	2 500	6 100	4 900	4 800	20 400	14 600	13 200

70 % de ces coûts sont fixés pour un mouillage de 1,4 m. Pour un aménagement de 1,9 et 2,4 m, les coûts d'installation des chantiers pour un aménagement de 2,0 m ont été conservés.

Les travaux secondaires et les imprévus ont été pris en considération avec 10 % des coûts de construction.

Pour le déblaiement des matériaux rocheux, rencontrés localement sur le reste du tronçon, le prix indiqué au tableau 10.1 b) pour les diverses profondeurs à aménager avec la mise en service de deux dragues sera appliqué pour les dragages de sable. Cette estimation est justifiée, étant donné que la flotte de dragage est également équipée pour le dérochement. Les frais d'équipement, d'exploitation et de personnel, qui résultent du dérochement, ont déjà été portés dans les prix de dragage. Des frais supplémentaires pour l'aménagement et le dégagement des chantiers ne se présentent pas.

Les coûts de dérochement sont calculés et récapitulés aux tableaux 10.2 b) à d).

Tableau 10.2 a): Récapitulation des coûts d'installation
et de dégagement des chantiers pour un
mouillage à aménager de 1,9 m

	Coûts en M.FCFA
Transport terrestre en Europe	3,8
Fret maritime, y compris chargement	36,8
Assurances	4,9
Déchargement à Dakar	34,2
Transport Dakar - Ambidédi	24,0
Total transport aller	103,7
Total transport retour	103,7
Coûts du matériel pour la durée de transport et le montage et le démontage	90,0
Coûts de personnel	30,0
Total	327,4
Total, plus 36 % pour frais généraux de l'entrepreneur	445,0

Tableau 10.2 b): Coûts pour les travaux de dérochement
sur le tronçon Ambidédi - Kayes

	Coûts en M. FCFA pour un mouillage à aménager de:		
	1,4 m	1,9 m	2,4 m
Prix unitaire (FCFA/m ³)	9 050	7 950	7 250
Volume de dérochement Ambidédi - Kayes (en m ³)	212 000	532 000	1 250 000
Coûts de construction	919	4 309	9 063
Installation et dégagement des chantiers	312	445	445
Total intermédiaire	2 231	4 754	9 508
Travaux secondaires et imprévus = env. 10%	219	446	877
Total des coûts pour le tronçon Ambidédi - Kayes, en M.FCFA	2 450	5 200	10 385

Tableau 10.2.c): Coûts pour les travaux de dérochement
entre Leboudou-Doué et Ambidédi

	Coûts en M. FCFA pour un mouillage à aménager de:		
	1,4 m	1,9 m	2,4 m
Prix unitaire (FCFA/m ³)	2 475	2 085	1 810
Leboudou-Doué - Vending	17	44	119
Vending - Matam	-	15	25
Matam - Bakel	92	77	67
Bakel - Ambidédi	30	46	76
Total intermédiaire	139	182	287
Travaux secondaires et imprévus = env. 10 %	11	18	28
Total en M.FCFA	150	200	315

Tableau 10.2 d) : Total des coûts pour les travaux de dérochement

Tronçon	Coûts en M.FCFA pour un mouillage à aménager de:		
	1,4 m	1,9 m	2,4 m
Leboudou-Doué - Ambidédi	150	200	315
Ambidédi - Kayes	2 450	5 200	10 385
Total	2 600	5 400	10 700

10.3 Coûts de construction des ouvrages de correction

10.3.1 Généralités

Les ouvrages de correction comprennent:

- les épis,
- les digues,
- les panneaux de surface et
- les panneaux de fond.

Les pierres représentent les matériaux les plus importants et sont donc déterminantes pour le montant des coûts de construction.

En outre, les matériaux suivants pourront ou devront également être utilisés en supplément:

- Nappes filtrantes non-tissées
- Gabions métalliques
- Sacs ou tuyaux en matière plastique
- Bois
- Gravier et ballast
- Sable.

Des études préalables ont montré que la construction d'épis en empierrements - sauf sur le cours inférieur du fleuve - est plus économique que l'utilisation de sacs ou de tuyaux en matière plastique remplis de sable. A ceci s'ajoute le fait que les épis en empierrements sont plus résistants et qu'une grande partie des coûts y afférents resteront dans le pays, car l'importation des sacs en matière plastique est annulée.

C'est pourquoi les coûts pour l'utilisation de sacs en matière plastique seront étudiés en tant qu'alternative uniquement pour l'aménagement du seuil de Dioudé Diabé.

Des épis en gabions métalliques conviennent lorsque les pierres sont trop petites.

10.3.2 Lieux d'extraction des pierres

De grandes quantités de pierres peuvent être extraites:

- dans le lit du fleuve entre Ambidédi et Kayes, au cours de la réalisation du chenal navigable et
- dans des carrières de la région de Bakel - Kidira.

Les matériaux extraits à Diawara et à d'autres endroits du fleuve ne sont importants, en raison de leur faible quantité, que s'ils sont utilisés sur place.

Les études suivantes sont basées sur l'hypothèse selon laquelle 40 % des matériaux extraits entre Ambidédi et Kayes, pour un mouillage à aménager de 1,9 m, pourront être utilisés pour la réalisation des ouvrages de correction. Ainsi, $0,40 \times 540\ 000 = \text{env. } 200\ 000\ \text{m}^3$ sont donc mis à disposition. Les ouvrages de correction pour les seuils de Goutioubé et de Khabou pourraient, avec

ces quantités, être réalisés. Des matériaux supplémentaires peuvent être extraits dans les carrières entre Bakel et Kidira.

10.3.3 Prix unitaires

10.3.3.1 Prix unitaires pour l'extraction et la fourniture

Les prix unitaires pour l'extraction et la fourniture sont calculés à la Mission A.1.7. Les prix les plus importants pour les matériaux des ouvrages de correction sont donnés à nouveau ci-dessous:

a) Pierres extraites du lit du fleuve

Dans la mesure où les matériaux seront extraits dans le cadre de la réalisation du chenal navigable, des frais supplémentaires pour l'extraction ne se présenteront pas.

b) Matériaux provenant des carrières

- Pierres: 2 725 FCFA/m³
- Gravier filtrant: 4 165 FCFA/m³

c) Autres matériaux

- Gabions:
 - . 0,5 x 0,5 x 2,0: 24 960 FCFA/m³
 - . 1,0 x 0,5 x 2,0: 17 820 FCFA/m³
 - . 1,0 x 1,0 x 4,0: 12 180 FCFA/m³
- Sacs en matière plastique, 1m³: 13 830 FCFA/m³
- Nappes filtrantes non-tissées: 450 FCFA/m³

10.3.3.2 Frais de transporta) Transport routier

Conformément à la Mission A.1.7, les frais de transport routier s'élèvent à:

- pour les routes bitumées: 27 FCFA/tkm
- pour les bonnes pistes: 34 FCFA/tkm
- pour les mauvaises pistes: 68 FCFA/tkm.

Il est supposé que la route N2 au Sénégal et la RN1 au Mali seront entièrement bitumées jusqu'à Kayes pour le début des opérations de transport.

b) Transport fluvial

Par mesure de précaution, 9,5 FCFA/tkm ont été estimés pour le transport avec les barges automotrices. 400 FCFA/t ont été pris en considération pour les coûts de transbordement. En outre, les coûts suivants ont été estimés pour le transport du lieu d'extraction au lieu de manutention:

- pour l'utilisation des matériaux extraits entre Ambidédi et Kayes:
 - 10 km x 34 FCFA/tkm = 340 FCFA/t, plus
 - chargement du camion = 210 FCFA/t;
- pour l'utilisation des matériaux extraits dans la carrière entre Bakel et Kidira:
 - 60 km x 27 FCFA/tkm = 1 620 FCFA/t
 - (Les coûts de chargement sont compris dans le prix d'extraction.)

Les frais pour le transport routier et le transport fluvial sont récapitulés aux tableaux 10.3.3.2 a) et b) pour les différents lieux de mise en oeuvre.

Tableau 10.3.3.2 a): Coûts de transport des pierres, transport routier

Lieu de mise en oeuvre	PK	Lieu d'extraction	Distance de transport en km		Coûts de transport en FCFA/t		Coûts de chargement en FCFA/t	Total des coûts en FCFA/t
			Route	Piste	Route	Piste		
Dioudé Diabé	441	Carrière	340	60	9180	4080	1)	13 260
N'Guidjilone	586	"	250	50	6750	3400	1)	10 150
Koundél	615	"	250	30	6750	2040	1)	8 790
Goumal	720	"	180	30	4860	2040	1)	6 900
Koungani	827	"	60	20	1620	1360	1)	2 980
Goutioubé	850	PK 925	-	60	-	4080	210	4 290
Khabou	865	PK 925	-	50	-	3400	210	3 610
Digokori	879	Carrière	-	60	-	4080	1)	4 080
Somone	893	"	-	75	-	5100	1)	5 100

1) Compris dans le prix unitaire pour les pierres.

Tableau 10.3.3.2 b): Coûts de transport des pierres, transport fluvial

Lieu de mise en oeuvre	PK	Lieu d'extraction	Distance de transport en km ¹⁾	Prix de transport en FCFA/t	Transport sur piste chargement + transbordement en FCFA/t ²⁾	Total des coûts en FCFA/t
Dioudé Diabé	441	carrière	375	3565	2020	5585
N'Guidjilone	586	"	230	2185	2020	4205
Koundél	615	"	201	1910	2020	3930
Goumal	720	"	96	910	2020	2930
Koungani	827	"	11	105	2020	2125
Goutioubé	850	PK 925	75	715	950	1665
Khabou	865	PK 925	60	570	950	1520
Digokeri	879	carrière	63	600	2020	2620
Somone	893	"	77	730	2020	2750

1) Les pierres extraites de la carrière seront déchargées à Bakel (PK 816)

2) $1620 + 400 = 2\ 020$ FCFA/t
 $340 + 210 + 400 = 950$ FCFA/t

Il ressort de la comparaison des coûts de transport que le transport routier est d'env. 1,4 à 2,6 fois plus cher que le transport fluvial. C'est pourquoi le transport par bateaux sera pris en compte pour les divers calculs.

10.3.3.3 Coûts de mise en oeuvre

a) Pierres

Les frais de mise en oeuvre des pierres sont estimés équivalents à ceux du transbordement, c'est-à-dire à 400 FCFA/t.

b) Coûts divers

- Travaux de terrassements pour la préparation de la plate-forme: 500 FCFA/m³
- Nappes filtrantes
Livraison et mise en oeuvre: 600 FCFA/m³
- Coûts secondaires et imprévus, en fonction des frais nets de construction: 10 %

10.3.4 Coûts d'installation et de dégagement des chantiers

Les coûts d'installation et de dégagement des chantiers sont fixés à uniquement 10 % des coûts nets de construction, car une partie du matériel disponible pour les travaux de dragage et de dérochement pourra être utilisée.

10.3.5 Coûts pour l'exploitation de la carrière

L'accès à la carrière à partir de la route Bakel - Kidira doit être suffisamment facile, afin de permettre un transport et une mise en oeuvre économique.

Pour le calcul des coûts d'exploitation, il a été tenu compte que environ 5 km de route en asphalte doivent être construits.

Route d'accès:

5 km x 16,0 M. FCFA/km = 80 M. FCFA

Aménagement de la carrière:

(estimation) = 200 M. FCFA

Total des frais d'exploitation = 280 M. FCFA
=====

10.3.6 Coûts de construction des ouvrages de correction

Les coûts de construction des ouvrages de correction pour les différents seuils sont récapitulés aux tableaux 10.3.6 a) et 10.3.6 b).

Tableau 10.3.6 a): Coûts nets de construction des ouvrages, 1ère phase d'aménagement

Lieu de mise en oeuvre	PK	Pierres			Travaux de terrassement		Nappe filtrantes	
		Volume en 10^3 m^3	Prix unitaire en FCFA/ m^3 1)	Prix en M.FCFA	Volume en 10^3 m^3	Prix en M.FCFA	Quantité en 10^3 m^2	Prix en M.FCFA
Dioudé Diabé	441	33,8	14 695	496,7	6,7	3,4	27,8	16,7
N'Guidjilone	586	17,9	11 935	213,6	0,6	0,3	8,1	4,9
Koundél	615	4,5	11 385	51,2	1,0	0,5	3,3	2,0
Goumal	720	48,4	9 385	454,2	4,0	2,0	58,2	34,9
Koungani	827	31,0	7 775	241,0	1,0	0,5	21,2	12,7
Goutioubé	850	80,7	4 130 2)	333,3	30,3	15,2	74,1	44,5
Khabou	865	102,6	3 840 2)	394,0	3,5	1,8	73,0	44,0
Digokori	879	71,8	8 765	629,3	3,3	1,7	74,3	44,6
Somone	893	64,3	9 025	580,3	1,6	0,8	40,0	24,0
Total	-	455,0	en moyenne env. 7 500	3 393,6	52,0	26,2	380,0	228,3

1) (Coûts de transport cf. au tableau 10.3.3.2 b) + coûts de mise en oeuvre en FCFA/t) x 2 + coûts d'extraction, étant donné que 1 t = env. $0,5 \text{ m}^3$.

2) Il n'existe pas de coûts d'extraction.

Tableau 10.3.6 b): Coûts de construction, y compris les coûts secondaires et l'installation et repli des chantiers, 1ère phase d'aménagement

Lieu de mise en oeuvre	PK	Coûts en M.FCFA						
		Pierres	Terrasse- ment	Filtres	Total in- termédiaire	Travaux se- condaires et imprévus	Installation et dégagement des chantiers	Total
Dioudé Diabé	441	496,7	3,4	16,7	516,8	51,2	52,0	620
N'Guidjilone	586	213,6	0,3	4,9	218,8	20,2	21,0	260
Koundél	615	51,2	0,5	2,0	53,7	5,3	6,0	65
Goumal	720	454,2	2,0	34,9	491,1	48,9	50,0	590
Koungani	827	241,0	0,5	12,7	254,2	25,8	25,0	305
Goutioubé	850	333,3	15,2	44,5	393,0	38,0	39,0	470
Khabou	865	394,0	1,8	44,0	439,8	42,2	43,0	525
Digokori	879	629,3	1,7	44,6	675,6	67,4	67,0	810
Somone	893	580,3	0,8	24,0	605,1	59,9	60,0	725
Total	-	3 393,6	26,2	228,3	3 648,1	358,9	363,0	4370
Installation d'une carrière								280
Total général								4650

10.3.7 Total des coûts pour les ouvrages de correction

Le total des coûts pour les ouvrages de correction est indiqué au tableau 10.3.7 pour chaque section du fleuve.

Les coûts d'exploitation de la carrière ont été répartis, à peu près en fonction des volumes de pierres nécessaires, entre les divers seuils, y compris ceux de Khabou et de Goutioubé.

10.4 Coûts de construction pour les solutions alternatives,
comparaison des prix

10.4.1 Epis en sacs en matière plastique à Dioudé Diabé

a) Utilisation de tuyaux en matière plastique

- Pieux	15 M. FCFA
- Tuyaux et leur contenu de sable	60 M. FCFA
- Travaux de dragage pour l'enraci- nement de l'épi	1 M. FCFA
- Protection pour l'enracinement et la tête de l'épi	244 M. FCFA
<u>Total</u> =====	<u>320 M. FCFA</u> =====

b) Utilisation de sacs en matière plastique
d'une capacité de 1 m³

- Dragage de la dépression du terrain	1 M. FCFA
- Sacs et leur contenu de sable	180 M. FCFA
- Dragage pour l'enracinement de l'épi	2 M. FCFA
- Protection pour l'enracinement et la tête de l'épi	152 M. FCFA
<u>Total</u> =====	<u>335 M. FCFA</u> =====

c) Epis en empierrements

Total des coûts (sans panneaux de surface)	
- Pierres	426 M. FCFA
- Nappes filtrantes	3 M. FCFA
- Travaux de dragage	1 M. FCFA
<u>Total</u> =====	<u>430 M. FCFA</u> =====

d) Comparaison des coûts et recommandation

La comparaison des coûts montre que les épis en tuyaux en matière plastique remplis de sable et en sacs en matière plastique remplis de sable sont moins chers que les épis en empierrements. Ceci est dû, dans le cas présent, aux coûts élevés de transport des pierres.

C'est pourquoi, pour ce seuil, des épis en sacs en matière plastique devraient être utilisés à titre d'essai, éventuellement alternativement avec des épis en empierrements. Si des résultats positifs sont obtenus, la Direction pourra réaliser les autres épis de cette façon.

10.4.2 Diawara (mouillage à aménager de 1,9 m)a) Coûts de la solution (1)

- Dragage	- M. FCFA
- Dérochement 1)	77 M. FCFA
- Ouvrages de correction	- M. FCFA

Total	77 M. FCFA
=====	=====

b) Coûts de la solution (2 a) (bref contournement)

- Dragage	+ 123 M. FCFA
- Dérochement	- M. FCFA
- Ouvrages de correction	+ 181 M. FCFA

Total	+ 304 M. FCFA
=====	=====

c) Coûts de la solution (2 b) (contournement allongé)

- Dragage	+ 703 M. FCFA
- Dérochement	- M. FCFA
- Ouvrages de correction	+ 461 M. FCFA

Total	+ 1 164 M. FCFA
=====	=====

d) Comparaison des coûts et recommandation

Vu la différence énorme des coûts des différentes solutions, seule la solution (1) peut être réalisée.

1) Le volume de dérochement est déjà calculé pour un mouillage de 2,4 m.

10.4.3 Boghé (mouillage à aménager de 1,9 m)a) Proposition principale

- Coûts pour le dragage	78 M. FCFA
- Coûts pour les ouvrages	- M. FCFA

Total =====	78 M. FCFA =====
----------------	---------------------

b) Différence des coûts pour l'alternative
(réalisation d'un nouveau chenal navigable)

- Coûts pour le dragage	+ 186 M. FCFA
- Coûts pour les ouvrages	+ 404 M. FCFA

Total =====	+ 590 M. FCFA =====
----------------	------------------------

c) Comparaison des coûts et recommandation

Compte tenu des coûts, la solution alternative ne peut pas être réalisée pour l'instant. Le chenal navigable devrait être, à long terme, déplacé. Les travaux de dragage peuvent donc être réalisés plus avantageusement avec le matériel de la Direction. Ceci s'applique également aux ouvrages de correction.

10.4.4 Bakel (mouillage à aménager de 1,9 m)a) Proposition principale

- Coûts pour le dragage	188 M. FCFA
- Coûts pour les ouvrages	- M. FCFA

Total
=====

188 M. FCFA
=====

b) Différence des coûts pour l'alternative
(réalisation d'un nouveau chenal navigable)

- Coûts pour le dragage	+ 1 172 M. FCFA
- Coûts pour les ouvrages	+ 318 M. FCFA

Total
=====

+ 1 490 M. FCFA
=====

c) Comparaison des prix et recommandation

Vu la différence des coûts, seule la solution (a) peut être réalisée. La réalisation d'un nouveau chenal navigable reste à l'appréciation de la Direction, qui peut effectuer ces travaux de façon nettement plus avantageuse avec son propre matériel.

10.4.5 Influence du barrage de Diama sur les coûts d'aménagement

Les volumes supplémentaires de dragage et de dérochement, y compris les tolérances à prendre en considération pour le tronçon Leboudou-Doué - Vending, s'obtiennent comme suit à partir des données du tableau 8.2.2.2 a):

- Mouillage à aménager: 1,4 m

. Volumes de dragage: 393 000 - 206 000 = 187 000 m³
 . Dérochement: 9 000 - 7 000 = 2 000 m³.

- Mouillage à aménager: 1,9 m

. Volumes de dragage: 928 000 - 486 000 = 442 000 m³
 . Dérochement: 24 000 - 21 000 = 3 000 m³.

Les travaux secondaires et les imprévus sont estimés à 10 % des coûts de construction. Les coûts d'installation et de dégagement de chantier ne sont par contre pas augmentés.

Les coûts supplémentaires qui surviendraient pour les travaux d'aménagement dans le cas où le barrage de Diama ne serait pas réalisé seraient, en prenant en considération les prix unitaires conformément aux tableaux 10.1 b) et 10.2 c) et un facteur d'augmentation de 1,1 pour les travaux secondaires et les imprévus, de:

- Mouillage à aménager: 1,4 m

. Dragage: 1,1 . 187 000 . 2 475 = 509 M. FCFA
 . Dérochement: 1,1 . 2 000 . 2 475 = 6 M. FCFA

Total
 =====

515 M. FCFA
 =====

- Mouillage à aménager: 1,9 m

. Dragage:	1,1	.	442 000	.	1 915	=	931 M. FCFA
. Dérochement:	1,1	.	3 000	.	2 085	=	6 M. FCFA

Total
=====

937 M. FCFA
=====

L'avantage du barrage de Diama pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation se traduit dans les coûts supplémentaires précités. Le projet pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation peut donc être grevé par le barrage de Diama d'un maximum d'environ:

- 515 M. FCFA pour un aménagement de 1,4 m et
- 940 M. FCFA pour un aménagement de 1,9 m.

A cet avantage s'oppose cependant le désavantage lié à une augmentation de la durée de rotation en raison des temps d'éclusage.

10.5 Etat des coûts

Le tableau 10.5 a) indique les coûts de dragage et de dérochement pour les mouillages à aménager étudiés de 1,4 m, 1,9 m et 2,4 m.

Les coûts de dragage indiqués pour un mouillage à aménager de 1,9 m et 2,4 m sont les coûts résultant de l'utilisation de trois dragues. Pour le mouillage de 1,4 m, on s'est basé sur l'utilisation de deux dragues seulement.

Une comparaison montre que les coûts de dragage et de dérochement pour un mouillage à aménager de 1,4 m sont:

- 2,0 fois plus élevés que pour un mouillage de 1,9 m et
- 4,7 fois plus élevés que pour un mouillage de 2,4 m.

Les coûts de dragage, à eux seuls, présentent la relation suivante:

- mouillage de 1,4 m: 100 %
- mouillage de 1,9 m: 192 %
- mouillage de 2,4 m: 528 %.

Le tableau 10.5 b) indique les coûts pour le dragage, le dérochement et les ouvrages pour divers mouillages à aménager et pour chaque section du fleuve.

Tableau 10.5 a): Coûts de dragage et de dérochement pour différents mouillages

Prestation	Coûts en M.FCFA pour un mouillage à aménager de		
	1,4 m	1,9 m	2,4 m
Dragage	2 500	4 800	13 200
Dérochement	2 600	5 400	10 700
Total dragage et dérochement	5 100	10 200	23 900

Tableau 10.2 c): Relevé des coûts des travaux

Travaux	Coûts des travaux en M.FCFA												
	Dragage			Dérochement			Ouvrages	Total par tronçon			Total cumulé		
Mouillage en m	1,4	1,9	2,4	1,4	1,9	2,4	1,4 à 2,4	1,4	1,9	2,4	1,4	1,9	2,4
St-Louis - Leboudou- Doué	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leboudou- Doué - Vending	780	1 280	3 836	18	48	131	660	1 458	1 988	4 627	1 458	1 988	4 627
Vending - Matam	-	319	1 563	-	16	27	345	345	680	1 935	1 803	2 668	6 562
Matam - Bakel	503	1 057	3 360	100	85	74	630	1 233	1 772	4 064	3 036	4 440	10 626
Bakel - Ambidédi	1 020	1 912	3 925	32	51	83	3 015	4 067	4 978	7 023	7 103	9 418	17 649
Ambidédi - Kayes	197	232	516	2 450	5 200	10 385	-	2 647	5 432	10 901	9 750	14 850	28 550
St-Louis - Kayes	2 500	4 800	13 200	2 600	5 400	10 700	4 650	9 750	14 850	28.550	-	-	-

Le tableau 10.5 c) indique les coûts en plus et en moins pour les alternatives.

Tableau 10.5 c): Coûts en plus et en moins pour les alternatives

Emplacement	Alternative	Coûts en plus en M. FCFA		Economie de coûts en M. FCFA
Dioudé-Diabé	-		-	110 ¹⁾
Boghé	-		590	-
Diawara	Solution 2a		277	-
	Solution 2b	1	087	-
Bakel	-	1	490	-

¹⁾ Epis en tuyaux en matière plastique remplis de sable.

11. Proposition pour le projet d'exécution et des études à élaborer ultérieurement

11.1 Proposition pour le projet d'exécution

Pour l'aménagement du fleuve Sénégal pour la navigation entre St-Louis et Kayes lors du débit de régularisation selon Cas N° 7, les coûts escomptés sont de l'ordre de 9 750 à 28 550 millions de FCFA, suivant la profondeur souhaitée à aménager. Pour l'aménagement de 2,4 m, les investissements pour les travaux sont environ 3 fois plus élevés que pour l'aménagement de 1,4 m. Pour un mouillage à aménager de 1,9 m, les coûts sont environ 1,5 fois plus élevés.

A cause de cette situation par rapport aux coûts, un chenal navigable d'une profondeur uniforme de $\geq 1,9$ m (enfouissement $\geq 1,5$ m) devrait être la solution optimale pour la première phase de l'exécution.

Une profondeur à aménager de 1,4 m lors de l'écoulement du débit de référence doit être exclu a priori en raison du débit plus faible pendant la phase transitoire. Pendant cette phase, la profondeur ne serait que d'environ 1,0 m et l'enfoncement admis 0,6 m, ce qui correspond à peu près à l'enfoncement du bateau à lège.

Etant donné que la durée de la phase transitoire est incertaine, il serait justifié d'aménager une profondeur qui permet déjà pendant la phase transitoire un enfouissement de 1,5 m (voir article 12.1).

Une comparaison des travaux et des coûts de construction pour les différents tronçons du fleuve montre que les

coûts d'aménagement du tronçon Ambidédi - Kayes sont très élevés. La réalisation d'un chenal navigable ayant une plus faible profondeur ou une plus faible largeur pourrait donc être d'abord envisagée.

La plus faible profondeur est exclue à priori pour les raisons précitées relatives à la profondeur utilisable pendant la phase transitoire.

Par contre, un chenal navigable plus étroit, permettant une circulation à une voie dans le secteur des seuils de ce tronçon, serait en principe possible. Etant donné que les seuils ont une longueur totale de 21 km et que le tronçon Ambidédi - Kayes n'a qu'une longueur de 43 km, les bateaux devraient s'attendre à des gênes importantes. A ceci s'ajoute le danger d'avaries qui ne pourra être supprimé qu'en partie même par un système de signalisation approprié. Un élargissement à une date ultérieure entraînerait des coûts bien plus élevés car les travaux de dérochement devraient être réalisés sous l'eau au moyen de matériel flottant et gêneraient en plus la circulation des bateaux.

Etant donné que l'aménagement partiel du tronçon Ambidédi - Kayes aurait en tout cas pour conséquence des désavantages considérables du point de vue technique, nautique et en matière d'exploitation et qu'il mettrait en question le transport rentable des marchandises en vrac telles que bauxite et minerais de fer de Kayes, le projet d'exécution de ce tronçon devrait en tout cas prévoir les mêmes dimensions du chenal navigable que pour les autres tronçons. La décision définitive relative aux dimensions à exécuter du chenal navigable peut alors être prise plus tard d'une façon plus facile et objective après consultation des coûts d'offres.

Compte tenu de ce qui précède, l'élaboration d'un projet de l'appel d'offres est recommandée, qui comprend:

- Un chenal navigable utilisable pendant toute l'année entre St-Louis et Kayes, ayant une profondeur de $\geq 1,9$ m (enfouissement $\geq 1,5$ m) lors du débit de référence du Cas N° 7 ou de la phase transitoire et une largeur permettant la circulation des convois M 3 sur deux voies.
- La réalisation de ce chenal navigable par dragages et dérochements.
- La construction d'ouvrages de correction aux endroits particulièrement critiques pour lesquels les dragages d'entretien assez importants sont escomptés.

Le projet de l'appel d'offres ne devrait pourtant pas comprendre:

- Des travaux de correction en aval de Podor qui ne seraient nécessaires que pour la mise en service de caboteurs d'un enfouissement de plus de 3,5 m et
- Des travaux de correction pour le Doué.

11.2 Etudes à élaborer ultérieurement

Dans le cadre de l'élaboration ultérieure du projet, les études suivantes doivent être encore effectuées:

- (1) Les documents d'appel d'offres pour les travaux de construction devraient mentionner qu'une partie du matériel de l'entrepreneur, convenant à la Direction de la Voie Navigable sera éventuellement reprise par cette dernière. Notamment les frais de transport pour

la réexpédition du matériel employé par l'entrepreneur et les frais de transport du matériel devant être acquis par la Direction pourraient être ainsi réduits. Ceci présenterait d'autre part l'avantage que le personnel de la Direction pourra être formé sur ce matériel.

- (2) L'élaboration du projet a montré que les seuils de Khabou et Goutioubé (embouchure de la Falémé) sont particulièrement critiques du point de vue hydraulique et que des coûts considérables devront être prévus pour leur aménagement. Pour pouvoir y réaliser une solution favorable aussi bien du point de vue de l'hydraulique que des frais, également ces seuils devraient être encore étudiés dans le modèle hydraulique.
- (3) Le levé des seuils connus du tronçon St-Louis-Leboudou-Doué devrait être également mis au concours dans le cadre des travaux d'aménagement (voir article 6.4.4.7).

12. Aménagement du chenal navigable en vue de la phase transitoire

12.1 Avant-propos

Les volumes et coûts de construction déterminés dans les chapitres 8 et 10 relatifs à la réalisation du chenal navigable se rapportent aux débits de référence de la régularisation définitive, c'est-à-dire au cas N° 7 du Groupement Manantali. Au cours de la phase transitoire (PT 1 du Groupement Manantali), la profondeur d'eau est réduite de 43 cm au maximum à cause d'un plus faible débit. Etant donné que les frais d'exploitation en augmenteraient considérablement et que la durée de la phase transitoire n'est actuellement pas prévisible, l'OMVS avait décidé d'aménager le chenal navigable entre St-Louis et Kayes de telle sorte que déjà au cours de la phase transitoire PT 1, une profondeur d'eau de référence de 1,90 m est disponible pendant toute l'année.

Dans les articles suivants, les volumes et les coûts relatifs au chenal navigable d'une profondeur de 1,90 m, portée sur le débit de la phase transitoire PT 1, sont établis. Les calculs approximatifs sont basés sur les cas 4, 5 et 8 du modèle mathématique et tiennent compte des abaissements du niveau d'eau par les plus faibles débits et de l'approfondissement du chenal navigable.

Après la réadaptation de l'exploitation du barrage de Manantali au cas définitif de régularisation (Cas N° 7), la profondeur d'eau sera supérieure à 1,90 m et la navigation en profitera. Les détails à ce sujet sont indiqués à l'article 12.5.

12.2 . Volume des travaux de dragage et de dérochement

Les volumes de dragage et de dérochement sont indiqués

- sans prise en considération des tolérances d'exécution au tableau 12.2 a) et
- avec la prise en considération des tolérances d'exécution conformément à l'article 8.2.2.2 au tableau 12.2 b).

Tableau 12.2 a) Volume à draguer et à dérocher sans prise en considération des tolérances

No du tronçon	Tronçon PK		Volume en 1000 m ³	
			Sable	Roche
1	Leboudou- Doué - Vending	244 - 489	541	34
2	Vending - Matam	489 - 637	238	11
3	Matam - Bakel	637 - 816	738	33
4	Bakel - Ambidédi	816 - 905	1 139	36
5	Ambidédi - Kayes	905 - 948	157	1 143
-	Total	244 - 948	2 873	1 257
			4 130	

Tableau 12.2 b) Volume à draguer et à dérocher y compris les tolérances

No du tronçon	Tronçon PK		Volume en 1000 m ³	
			Sable	Roche ¹⁾
1	Leboudou - Doué - Vending	244 - 489	787	34
2	Vending - Matam	489 - 637	383	11
3	Matam - Bakel	637 - 816	1 193	37
4	Bakel - Ambidédi	816 905	1 649	36
5	Ambidédi - Kayes	905 948	243	1 143
-	Total	244 - 948	4 255	1 261

12.3 Déroulement des travaux

Les indications contenues dans l'article 9, relatives à la mise en service du matériel et au déroulement des travaux s'appliquent par analogie également au présent cas. Cependant, lors de la mise en service d'au moins trois dragues, il faudra compter avec une période de construction de trois ans.

Il est particulièrement important de commencer à temps les travaux de dérochement pour les effectuer entre Ambidédi et Kayes à sec. A cause du volume plus élevé de dérochement, l'exécution des travaux doit débiter, même si le nombre de matériels indiqué au tableau 9.2.2 est augmenté, au moins 2 1/2 ans, mieux encore 3 ans avant la mise en eau du barrage Manantali.

¹⁾ En ce qui concerne les tolérances pour le dérochement, voir l'article 8.2.2.2.

12.4

Coûts de construction

Les coûts pour les travaux de dragage sont réunis au tableau 12.4 a) aussi bien pour la mise en service de deux que de trois dragues à godets. Les prix unitaires pour les volumes de dragage indiqués à l'art. 12.2 ont été déterminés conformément aux indications de l'art. 10.1.

Tableau 12.4 a) Coût pour les travaux de dragage

Nombre de dragues	2	3
Prix unitaire en FCFA/m ³	1 885	1 675
Tronçon	en millions de FCFA	
Leboudou-Doué - Vending	1 483	1 318
Vending - Matam	722	642
Matam - Bakel	2 249	1 998
Bakel - Ambidédi	3 108	2 762
Ambidédi - Kayes	458	407
Total	8 020	7 127
Installation et repli du chantier	664	876
Total intermédiaire	8 684	8 003
Travaux divers et imprévus	916	797
Coût total des travaux	9 600	8 800

Le prix unitaire pour les travaux de dérochement a été pris - à partir des volumes de roches de l'art. 12.2 - de la fig. 10.2. Les coûts pour les travaux de dérochement sont réunis au tableau 12.4 b).

Tableau 12.4 b) Coût pour les travaux de dérochement

	Coût en millions de FCFA pour les tronçons		
	Leboudou-Doué - Ambidédi		Ambidédi - Kayes
Prix unitaire en FCFA/m ³	1 885		7 325
Volume de dérochement en m ³	118 000		143 000
Coût net des travaux	222		8 372
Installation et repli du chantier	-		445
Total inter- médiaire	222		8 817
Travaux divers et imprévus	28		883
Coût total des travaux	250		9 700
Total général	9 950		

Les coûts de construction y compris les frais accessoires relatifs

- aux travaux de dragage
- aux travaux de dérochement et
- à la construction des ouvrages

sont indiqués au tableau 12.4 c) pour les différents tronçons du fleuve. En ce qui concerne les coûts pour les travaux de dragage, la mise en service de trois dragues a été considérée.

Tableau 12.4 c) Relevé des Coûts

Tronçon	Coûts en millions de FCFA				
	Dragage	Dérochement	Ouvrages	Total par tronçon	Total cumulé
St-Louis - Leboudou-Doué	-	-	-	-	-
Leboudou-Doué - Vending	1 628	72	660	2 360	2 360
Vending - Matam	792	23	345	1 160	3 520
Matam - Bakel	2 467	78	630	3 175	6 695
Bakel - Ambidédi	3 410	77	3 015	6 502	13 197
Ambidédi - Kayes	503	9 700	-	10 203	23 400
St-Louis - Kayes	8 800	9 950	4 650	23 400	-

12.5 Profondeurs d'eau au cours de la phase définitive de régularisation

Lors de l'aménagement du fleuve Sénégal avec $T_{\text{réf}} = 1,90 \text{ m}$ pour la phase transitoire PT 1, de plus grandes profondeurs d'eau seront à la disposition de la navigation dès que le barrage de Manantali sera exploité conformément au cas de régularisation N° 7 définitif.

Les différences du niveau d'eau indiquées à l'art. 7.3, de 0,19 m à 0,43 m, qui ont été calculées à partir du cas 8 du modèle mathématique, ne peuvent pas être obtenues si au lieu des débits régularisés, les débits de la phase transitoire s'écoulent dans le lit aménagé à une profondeur de 2,0 m. Les conditions d'écoulement sont plus favorables du point de vue hydraulique dans le lit du fleuve déjà aménagé à une plus grande profondeur, et font escompter environ les relèvements suivants du niveau d'eau:

- Leboudou-Doué - Vending	0,15 m
- Vending - Matam	0,25 m
- Matam - Bakel	0,35 m
- Bakel - Ambidédi	0,35 m
- Ambidédi - Kayes	0,30 m

Cependant les bateaux qui circulent entre St-Louis et Kayes sans escale ne peuvent profiter directement que de 15 cm par un plus grand volume de charge. Les autres pourtant, qui font plusieurs escales, peuvent - à condition que le volume des marchandises à transporter le permet - utiliser par un complément de charge également la plus grande profondeur d'eau qui existe sur certains tronçons du fleuve. Mais aussi la navigation directe peut profiter de cette plus grande profondeur d'eau étant donné que le pied de pilote en augmente et

qu'ainsi les efforts résistants diminuent. Le profit (profit indirect) s'exprime alors par une augmentation de la vitesse ou par une réduction de la consommation de carburant.

Par l'augmentation de l'enfoncement de 0,15 m la capacité de chargement d'une barge automotrice M 1 augmente de 17 %, de 520 t à 610 t.

La capacité de transport annuelle de ce bateau montera de 17,3 millions de tkm de 10 % à environ 19,0 millions de tkm pour le transport de marchandises diverses, lors d'un service de 24 h. Les prix de revient relatifs au transport de marchandises diverses diminueront de 14 %, de 5,58 FCFA/tkm à environ 4,80 FCFA/tkm par une augmentation de l'enfoncement de 15 cm. Pour les autres cas de transports et types de convois ces indications sont applicables par analogie (voir à ce sujet annexes 5 à 10 de la Mission A.1.11).

12.6

Facteurs de sécurité relatifs à la profondeur d'eau

En vertu des expériences acquises lors de l'approfondissement des chenaux navigables de divers fleuves, la profondeur d'eau (profondeur de référence) doit être au moins de 40 cm plus grande que l'enfoncement. Cette profondeur de référence doit être garantie par la Direction de la Voie Navigable. Ceci est pourtant seulement possible si les tolérances inévitables relatives aux marges de sécurité du calcul hydraulique et aux inégalités du fond du fleuve, sont couvertes par des suppléments.

En tenant compte des conditions locales, les tolérances suivantes ont été prévues pour le fleuve Sénégal:

- Pour la topographie et bathymétrie 10 cm
- Pour le calcul hydraulique de la hauteur du niveau d'eau 5 cm
- Pour les modifications inévitables du fond du fleuve et élévations locales, comme
 - . cannelures du fond sablonneux 15 cm
 - . des pierres isolées et cailloux sur un fond rocheux 30 cm

Il en résulte donc, porté sur la profondeur d'eau de référence, un supplément pour la sécurité du trafic:

- de 30 cm pour les tronçons de fleuve ayant un fond sablonneux,
- de 45 cm pour les tronçons de fleuve ayant un fond rocheux.

Selon l'expérience, ces majorations de sécurité ne sont pas du tout surestimées et une diminution ne peut donc pas être envisagée, si la profondeur de référence doit être garantie.

A ce sujet, il doit être constaté que les marges de sécurité sont indépendantes de l'intensité du trafic. La pratique montre que, lors d'une plus faible intensité du trafic, la plupart des bateaux circulent au milieu du chenal navigable. De ce fait, cette voie, lorsqu'il s'agit de fond sablonneux, est creusée par l'eau remuée par l'hélice et le sable soulevé se dépose sur les côtés de la voie. Lors d'un trafic dense avec de nombreux

croisements, ceci se fait beaucoup moins ressentir. Il en résulte donc que, lorsque le trafic est moins dense, les suppléments ne doivent en aucun cas être réduits.

La façon dont la profondeur de référence garantie par l'administration sera exploitée par la Compagnie de Navigation ou par le pilote, reste en partie à l'appréciation de la Compagnie ou du pilote et dépend, entre autres, du type de bateau ou de convoi et des conditions météorologiques (vent, vagues). Pour la détermination de la capacité de transport, on est parti d'un pied de pilote de 40 cm.

12.7

Tirants d'air et hauteurs des recouvrements

Les tirants d'air à prévoir en amont et en aval de Podor sont indiqués à l'art. 5.6.1. Le tirant d'air de 8,5 m au-dessus des plus hautes eaux navigables P.H.E.N pour le trajet en amont de Podor a été proposé en vue de la mise en service ultérieure de convois poussés sur le fleuve Sénégal.

Conformément à la Mission A.1.9, la hauteur du point fixe des pousseurs est de 8,0 m. Compte tenu d'une marge de sécurité de l'ordre de 0,50 m pour des ponts, le tirant d'air est alors de 8,50 m au-dessus des P.H.E.N (voir fig. 12.7 a)).

En aval de Podor, le tirant d'air est déterminé par la hauteur des caboteurs. Dans la mesure où des caboteurs normaux seront mis en service, il faut partir d'une hauteur du point fixe de 11,5 m au minimum (voir Mission A.1.9, tableau 5.2.6.3). Compte tenu d'une marge de sécurité de 0,50 m, un tirant d'air de 12,0 m en résulte.

Lors de l'utilisation de caboteurs spéciaux pour le transport fluvio-maritime, la timonerie peut être réalisée plus basse ou les bateaux peuvent être équipés d'une timonerie escamotable par système hydraulique. Dans ce cas, le tirant d'air de 8,5 m requis pour les convois poussés, serait suffisant.

En ce qui concerne le tirant d'air des lignes aériennes, voir l'article 5.6.2. Quant au tronçon en aval de Podor, les indications ci-dessus sont à appliquer par analogie.

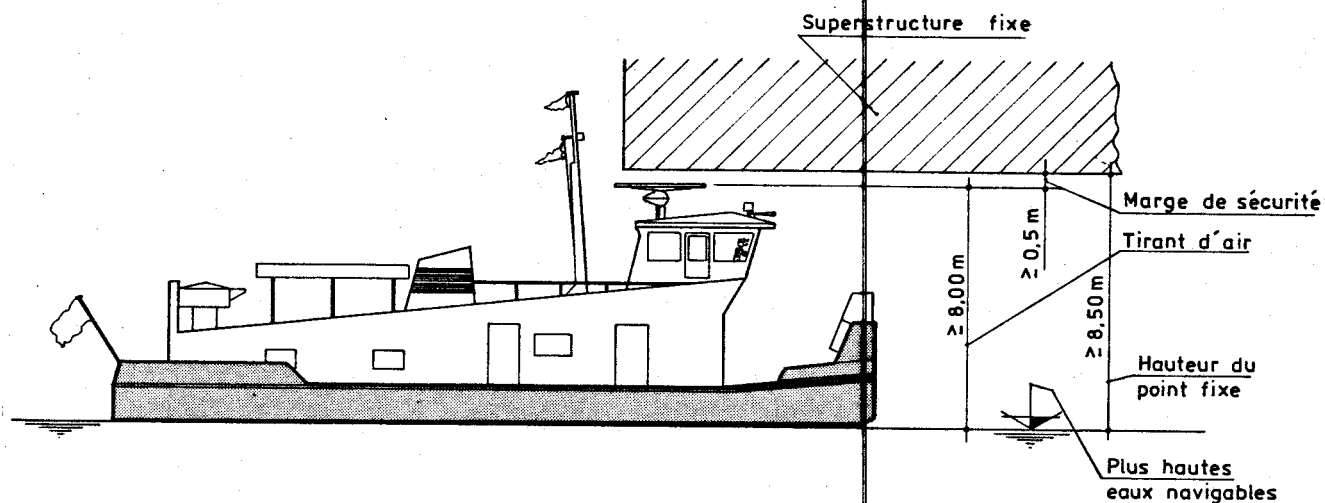
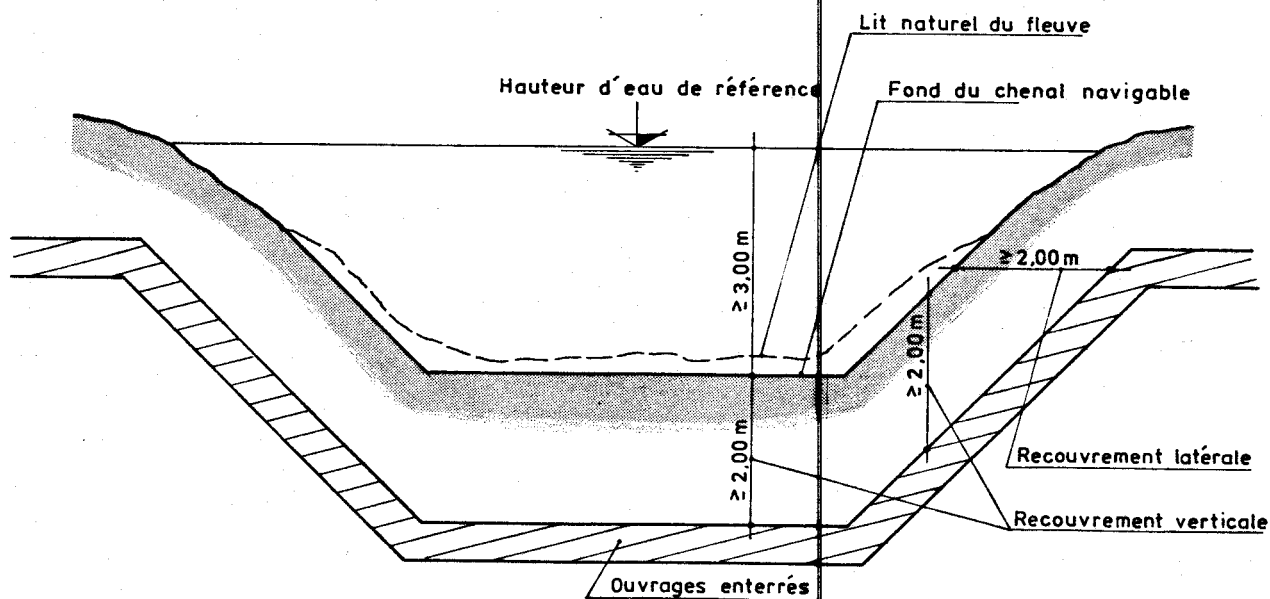
Pour les localités les plus importantes, les hauteurs minimales du bord inférieur des ponts et les points les plus bas des lignes aériennes, indiqués au tableau 12.7, s'ensuivent par conséquent.

Tableau 12.7: Altitude des ponts et lignes aériennes

Localité	PK	Altitude par rapport à IGN pour	
		le bord inférieur du pont	le point le plus bas des lignes aériennes
Kayes	948	38,0	44,5
Bakel	816	31,0	37,5
Matam	632	24,0	30,5
Kaédi	542	21,0	27,5
Saldé	481	19,5	26,0
Boghé	382	17,5	24,0
Podor	266	14,0 (17,5) ¹⁾	20,5 (25,5) ¹⁾
Dagana	169	12,0 (15,5)	18,5 (23,5)
St-Louis	0	10,0 (13,5) ²⁾	16,5 (21,5) ²⁾

1) Les valeurs entre parenthèses sont valables pour des caboteurs normaux.

2) pas suffisant pour des navires maritimes.

Fig. 12.7 a) : Tirant d'airFig. 12.7 b) : Recouvrement des ouvrages enterrés

La hauteur de recouvrement indiquée à l'article 5.6.3, d'au moins 2,0 m (voir fig. 12.7 b)) a été choisie en tenant compte des tronçons du fleuve avec un fond sablonneux pour éviter un endommagement des conduites croisant le lit du fleuve, par des ancres.

Des essais réalisés en Allemagne Fédérale avec des ancres lors d'un fond sablonneux, ont montré que celles-ci entrent dans le sol jusqu'à une profondeur de 1,5 m au maximum, de sorte qu'un recouvrement de 2 m est suffisant quand il n'y a pas de danger d'affouillement.

Lors d'un fond rocheux, le recouvrement peut être réduit à 1,50 m si une couche supérieure en pierres d'une épaisseur de 1,0 m est prévue.

Toutes les hauteurs de recouvrement ne sont que des valeurs approximatives et doivent pour chaque cas individuel être fixées par la Direction de la Voie Navigable en fonction des conditions locales, comme nature du fond et vitesses du courant, la sorte des conduites etc.. Les dommages qui s'ensuivent d'un endommagement éventuel de la conduite doivent également être dûment pris en considération. En outre, la pose des conduites doit être surveillée par la Direction de la Voie Navigable et il faut observer strictement les prescriptions y relatives.

12.8

Dragages d'essai

En raison des expériences générales, l'exécution de dragages d'essai est recommandée avant la réalisation d'un grand projet de dragages. Ceux-ci sont particulièrement importants et de grande valeur quand des interventions plus considérables doivent être entreprises dans le lit naturel du fleuve, que des expériences pratiques relatives aux conditions locales manquent encore et que les effets de l'aménagement sur les modifications naturelles du lit du fleuve ne sont pas connus.

A cette fin, il est particulièrement recommandé et surtout en considération du chenal navigable prévu approfondi à 1,90 m, porté sur les débits de la phase transitoire, de faire mettre au concours et exécuter de tels dragages d'essais également en vue du présent projet. Les expériences acquises par ces essais, relatives

- aux travaux préparatifs,
- à la mise en service du matériel,
- à la manière de l'exécution,
- à la durée à prévoir pour le déplacement des matériels,
- au rendement des matériels,
- à la réaction du fond du lit du fleuve au cours du dragage et lors du passage de la crue,
- au comportement des déblais de dragage déposés dans des creux ou dans le lit mineur en dehors du chenal navigable, lors du passage de la crue (voir Mission A.1.14, article 5.2.2.1),
- à la surveillance des travaux ainsi qu'
- en vue des questions administratives et de décompte

profiteront alors à une exécution sans difficultés des travaux principaux de dragage.

Les dragages d'essai devraient commencer deux ans avant le début des travaux de dragage et être exécutés pendant toute une année. Après le passage de la crue, les modifications du lit du fleuve peuvent être constatées et les résultats du dragage d'essai évalués.

En plus il est recommandé de mettre au concours le dragage d'essai et le dragage principal ensemble sous réserve que l'OMVS a le droit d'attribuer les dragages d'essai conjointement avec le dragage principal ou seulement le dragage principal ou d'abord seulement le dragage d'essai. Cette méthode permet à l'OMVS l'appréciation nécessaire et de peser les avantages du dragage d'essai contre les coûts y relatifs. L'attributaire aura l'avantage de se familiariser mieux avec la situation locale et de pouvoir, grâce aux expériences acquises, adapter de façon optimale la mise en service des matériels ainsi que le déroulement des travaux aux conditions locales.

La quantité draguée au cours du dragage d'essai dépend essentiellement du matériel mis en service par l'attributaire. Elle sera en tout cas inférieure que plus tard lors des dragages principaux et peut être estimée avec précaution à 250 000 jusqu'à 350 000 m³.

12.9

Aménagement du fleuve en plusieurs étapes

Conformément aux dispositions précédentes, l'aménagement du fleuve Sénégal est prévu pour une profondeur de 1,90 m portée sur le débit de référence et une largeur régulée de 55 m.

Au cas où les coûts d'investissement doivent être réduits par suite de restrictions financières, les économies suivantes peuvent être prises en considération:

- réduction de la largeur à aménager
- réduction de la profondeur à aménager
- réduction de la longueur à aménager.

12.9.1

Réduction de la largeur à aménager

La diminution de la largeur permettrait certes une économie de coûts, mais compromettrait d'un autre côté la facilité et sécurité de la navigation.

A ce propos, il faudrait mentionner que les coûts de l'aménagement entrent seulement pour 5 à 13 % dans les coûts de transport. Ceci explique que les économies de coûts par une diminution de la largeur à environ 35 m ne sont pas en proportion économiquement justifiable de la diminution de la sécurité de la navigation.

Il s'y ajoute que sur des tronçons du fleuve sablonneux il y a le danger lors du passage d'une crue qu'un mince chenal peut plus vite ensabler qu'un chenal plus large. Ainsi le risque d'une interruption temporaire de la navigation monte avec une largeur plus réduite.

Sur le tronçon rocheux, relativement rectiligne Ambidédi - Kayes, le chenal navigable doit être exécuté sur une longueur d'environ 21 km. Si l'on réalisait ici dans le secteur du seuil le chenal navigable à une voie, d'une largeur d'environ 35 m, d'abord environ 40 % des coûts de construction de ce tronçon, c'est-à-dire envi-

ron 3,8 milliards de FCFA, pourraient être économisés. Lors d'un élargissement ultérieur pourtant, environ le triple de cette somme serait à dépenser, étant donné que les travaux de dérochement devraient alors être exécutés sous l'eau. Quant aux autres désavantages, voir l'article 11.1.

12.9.2 Réduction de la profondeur à aménager

Les incidences d'une profondeur réduite sur le coût de transport ont été traitées dans la Mission A.1.11, article 14.7. En conséquence la profondeur à aménager choisie correspond à peu près à la profondeur optimale. Lors d'une diminution de la profondeur, les coûts de l'exploitation de la navigation augmentent plus que les coûts baissent par suite d'une réduction de la profondeur. Par conséquent une réduction de la profondeur à aménager ne peut pas être recommandée du point de vue de l'économie générale.

12.9.3 Réduction de la longueur à aménager

Au cas où le tronçon Ambidédi - Kayes n'est pas aménagé, les économies sont de l'ordre d'environ 10,0 milliards de FCFA. Lors d'un aménagement ultérieur de ce tronçon, il faudrait cependant dépenser environ 30 milliards de FCFA.

12.10 Coûts supplémentaires pour l'entretien

L'aménagement de la voie navigable d'une profondeur d'eau de 1,90 m pour la phase transitoire représente une plus

forte intervention qu'un aménagement avec la même profondeur, portée sur le débit définitif de la régularisation. Par conséquent, il faut s'attendre également à des travaux d'entretien plus importants.

Comme déjà indiqué à l'article 3.2.4, des précisions quantitatives relatives aux travaux d'entretien escomptés ne peuvent par suite du grand nombre de paramètres sans travaux de correction sur des tronçons d'essai pas être données. Pour cette raison entre autres, des dragages d'essai ont été recommandés.

En vue de la détermination du prix de revient relatif au transport fluvial lors d'une profondeur à aménager de 1,90 m pour la phase transitoire, les coûts supplémentaires à escompter pour l'entretien ont été pris en considération par l'augmentation des dépenses de la Direction à 5 %.

12.11

Résumé

En tenant compte de la commande de l'OMVS et des indications précédentes, un projet d'appel d'offres sera élaboré au cours de la deuxième phase d'études qui comprend:

- Un chenal navigable pendant toute l'année entre St-Louis et Kayes d'une profondeur d'eau de référence de 1,9 m (enfoncement = 1,5 m) lors de l'écoulement des débits de la phase transitoire PT 1 et d'une largeur qui permet la circulation à double voie de convois M3.
- La réalisation de ce chenal navigable par dragages et dérochements.

- La construction d'ouvrages de correction aux endroits spécialement critiques pour lesquels des dragages d'entretien particulièrement importants sont à escompter.

Dans le projet d'appel d'offres

- des ouvrages de correction en aval de Podor, qui ne seraient nécessaires que pour des caboteurs d'un enfoncement supérieur à 3,5 m et
 - des travaux pour la régularisation du Doué
- ne sont pas prévus.

13. Etudes et publications relatives à l'aménagement
du fleuve Sénégal

[1] IVANOV, V.V.: Rapport sur les études hydrologiques du fleuve Sénégal, St-Louis, juillet 1969

Annexe 1: Graphiques du régime des seuils

Annexe 2: Tableaux du dépouillement des observations sur les seuils

Annexe 3: Tableaux de dépouillement statistique des hauteurs d'eau pour plusieurs années aux stations du fleuve Sénégal

Annexe 4: Graphiques annuels de durée des hauteurs d'eau aux stations du fleuve Sénégal

Annexe 5: Tableaux annuels de fréquence et de durée des hauteurs d'eau aux stations de Kayes et d'Ambidédi

Annexe 6: Tableaux annuels de fréquence et de durée des hauteurs d'eau à la station de Bakel

Annexe 7: Tableaux annuels de fréquence et de durée des hauteurs d'eau à la station de Matam

Annexe 8: Tableaux annuels de fréquence et de durée des hauteurs d'eau à la station de Kaédi

Annexe 9: Tableaux annuels de fréquence et de durée des hauteurs d'eau à la station de Saldé

Annexe 10: Tableaux annuels de fréquence et de durée des hauteurs d'eau à la station de Boghé

Annexe 11: Levés topographiques et hydrographiques de l'embouchure et de la Langue de Barbarie au sud de St-Louis

Annexe 12: Levés topographiques et hydrologiques de la Langue de Barbarie et de la Mer au Nord de St-Louis

[2] SERVICE HYDROLOGIQUE

Annuaire hydrologique
Année hydrologique 1968 - 1969
Ministère du Développement Industriel
et des Travaux Publics
Direction de l'Hydraulique et de
l'Energie
Bamako 1969

[3] POMERANTSEV, V.N.

Appréciation préliminaire des
conditions de navigation et des
frais de transport de marchandises
sur le fleuve Sénégal après son
aménagement
St-Louis, février 1969

Rapport technico-économique sur le
développement des transports sur le
fleuve Sénégal
St-Louis, octobre 1969

Annexe au rapport technico-économique
octobre 1970

Rapport sur le développement éventuel
du trafic de passagers sur le fleuve
Sénégal
St-Louis, décembre 1970

[4] MEGLITSKY, A.M.

Rapport sur les études des ports et
escales du fleuve Sénégal
St-Louis, juillet 1970

Annexe au rapport sur les études des
ports et escales du fleuve Sénégal
St - Louis, juillet 1970

Rapport sur les recherches hydrogra-
phiques et topographiques sur les
ports et escales du fleuve Sénégal
entre Rosso et Kayes
St - Louis, novembre 1970

Schéma d'amélioration et de développe-
ment des ports et escales du fleuve
Sénégal
St - Louis, décembre 1970

[5] SENEGAL-CONSULT
SWITZERLAND

Feasibility survey for the regulation of the
Senegal river
Design of a system of water management planning
in the upper Senegal river catchment
Hydrologie
Volume 3A
Text and annexes

Volume 3B
Appendices
New York 1970

[6] BEZIUKOV, K.I.

Système de balisage pour le fleuve Sénégal
novembre 1970

Recommandations pour l'aménagement des conditions
de navigation sur le fleuve

Tome I: Etat actuel du fleuve
Développement des transports et
objectifs de l'aménagement de la voie
d'eau
St - Louis, mars 1971

Tome II: Balisage

Organisation du service de balisage
St - Louis, novembre 1970

Tome III: Travaux d'aménagement de la voie
navigable

St - Louis, mars 1971

Annexe: Plans des seuils du fleuve
Sénégal

St - Louis, mars 1971

[7] DELAISI, J.

Rapport à Monsieur le Secrétaire Général de
l'O.E.R.S. concernant la navigation sur le
fleuve Sénégal
janvier 1971

[8] SURVEYER,
NENNINGER ET
CHENEVERT INC.

Etude de la navigabilité et des ports du fleuve
Sénégal
Etudes portuaires à St - Louis, Kayes et Ambidédi
Rapport N° 1 - Travaux préliminaires
Volume 1 - Rapport principal
Volume 2 - Annexes
février 1972

Rapport N° 2 - Rapport définitif
avril 1973

[9] NAGUIB, D.H.

Rapport de fin de Mission
Projet de code relatif à la navigation et aux
transports sur le fleuve Sénégal
St - Louis, février 1972

- [10] NATIONS UNIES Spécifications relatives à un caboteur en acier
à moteur de 150 tonnes de port en lourd
New York, 1974
- Spécifications relatives à un cargo en acier à
moteur de 350 tonnes de port en lourd
- Spécifications relatives à une vedette de rivière
pouvant transporter 60 passagers
- [11] NATIONS UNIES Etude de la navigabilité et des ports du
fleuve Sénégal
Programme des Nations Unies pour le Développement
New York, 1974
- [12] OULD HAMDINOU, A. Hauteurs limnimétriques dans la
Vallée de Bakel à Ronq
1965 - 1974
mai 1974
- [13] ROCHETTE, C. Le bassin du fleuve Sénégal
Monographies hydrologiques
ORSTOM
Paris 1974
- [14] REPUBLIQUE POPU- Compte rendu oral des études du Barrage de
LAIRE DE CHINE Manantali
(Mission chinoise chargée des études vérificatives
du Barrage de Manantali)
novembre 1974
- [15] BEYRARD, N. Programme intégré de développement du bassin du
fleuve Sénégal
Tome VII: Navigation
Tome IX: Mise en oeuvre
1974

- [16] O.M.V.S. Les objectifs et les grandes lignes de la
stratégie de développement intégré du bassin
du fleuve Sénégal
mai 1974

- [17] O.M.V.S. Etude d'exécution du barrage de Diama,
Termes de référence
1975

- [18] O.M.V.S. Hydrologie du fleuve Sénégal de Bakel
à St-Louis de 1965 à 1976
avril 1976

- [19] O.M.V.S. Le programme de l'O.M.V.S.
Présentation, méthodes et moyens de
mise en oeuvre
mai 1976

- [20] O.M.V.S. Aménagement du bassin versant du fleuve
Sénégal
octobre 1976

- [21] O.M.V.S. Premiers éléments sur la crue et la
décrue 1976 - 1977 du fleuve Sénégal
décembre 1976

- [22] O.M.V.S. Aménagement du bassin versant du
fleuve Sénégal

Périmètre d'irrigation en Mauritanie
décembre 1976

- [23] SOGREAH
INGENIEURS-
CONSEILS Etude d'exécution du barrage de Diama
Rapport sur l'exploitation du modèle
mathématique
Grenoble, janvier 1977

- [24] GROUPEMENT MANANTALI
INGENIEURS-CONSEILS
Etude d'exécution du barrage et de l'usine hydroélectrique de Manantali
Mission A. 1.2 Hydrologie
Mission A. 1.3 Navigabilité
Mission A. 1.5 Régularisation
février 1977
- [25] CONFERENCE FRANCO-AFRICAINE DES CHEFS D'ETAT ET DE GOUVERNEMENT
Aménagement du bassin du fleuve Sénégal
avril 1977
- [26] O.M.V.S.
Périmètres d'irrigation sur la rive gauche du fleuve Sénégal
avril 1977
- [27] SOGREAH
Modèle mathématique de la vallée du fleuve Sénégal
- [28] O.M.V.S.
Etude d'exécution des ports et escales du fleuve Sénégal, termes de référence,
mai 1975
- [29] O.M.V.S.
Termes de référence pour l'évaluation des effets sur l'environnement d'aménagement prévu dans le bassin du fleuve Sénégal
avril 1977
- [30]
Handbuch der Westküste Afrikas von 1937 (Manuel de la côte de l'Afrique occidentale de 1937)
Edité par Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg (Institut allemand hydrographique à Hambourg)
- [31]
Comme ci-dessus, édition de 1972

[32] NATIONS UNIES Atlas Nautique du Fleuve Sénégal
Tome I: Embouchure - Port de Boghé
Paris 1971

