

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

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

**Mission A. 1.6: Essais sur modèles réduits**

**GROUPEMENT D'INGENIEURS-CONSEILS**

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

**Dorsch-Consult  
Munich, R.F.A.**

**Electrowatt  
Zurich, Suisse**

09882

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
1. <u>Résumé</u>	1 - 1
2. <u>Bases générales pour les essais sur modèle hydraulique</u>	2 - 1
2.1 Généralités	2 - 1
2.2 Limites des modèles	2 - 1
2.3 Echelles des modèles hydrauliques	2 - 1
2.4 Relations de similitude	2 - 2
2.5 Documents pour la construction et l'opération des modèles	2 - 4
2.6 Construction des modèles	2 - 5
2.7 Appareils de contrôle et instruments de mesures	2 - 6
2.8 Etalonnage des modèles réduits	2 - 7
3. <u>Exécution des essais sur modèle réduit</u>	3 - 1
3.1 Embranchement du Doué	3 - 1
3.1.1 But des essais	3 - 1
3.1.2 Modèle et étalonnage	3 - 1
3.1.3 Solutions d'aménagement	3 - 5
3.1.4 Recommandation	3 - 9
3.2 Barrière rocheuse de Diawara (PK 793)	3 - 10
3.2.1 But des essais	3 - 10
3.2.2 Modèle et étalonnage	3 - 10
3.2.3 Solutions d'aménagement	3 - 13
3.2.4 Recommandation	3 - 15
3.3 Seuil rocheux de Tambounkané (PK 920 au PK 923)	3 - 16
3.3.1 But des essais	3 - 16
3.3.2 Modèle et étalonnage	3 - 17
3.3.3 Aménagement du fleuve Sénégal dans le secteur du seuil rocheux	3 - 19
3.3.4 Recommandation	3 - 21

TABLE DES MATIERES  
DES PLANS

Embranchement du Doué

- T 6161-6-1 Etat naturel - Niveaux d'eau
- T 6161-6-2 Etat naturel - Ecoulement
- T 6161-6-3 Solutions 1 et 1a - Situation
- T 6161-6-4 Solution 1a - Niveaux d'eau
- T 6161-6-5 Solution 1a - Ecoulement
- T 6161-6-6 Solutions 2 et 2a - Niveaux d'eau
- T 6161-6-7 Solution 2 - Ecoulement
- T 6161-6-8 Solution 2a - Ecoulement

Barrière rocheuse de Diawara

- T 6161-6-9 Etat naturel - Niveaux d'eau
- T 6161-6-10 Etat naturel - Ecoulement
- T 6161-6-11 Solution 1 - Ecoulement
- T 6161-6-12 Solutions 1 et 2 - Niveaux d'eau
- T 6161-6-13 Solution 2 - Ecoulement
- T 6161-6-14 Solution 3 - Ecoulement
- T 6161-6-15 Solution 3 - Niveaux d'eau
- T 6161-6-16 Solution 3a - Ecoulement

Seuil rocheux de Tambounkané

- T 6161-6-17 Etat naturel - Niveaux d'eau
- T 6161-6-18 Etat naturel - Ecoulement
- T 6161-6-19 Solutions d'aménagement - Niveaux d'eau

T 6161-6-20 Etat d'aménagement - Ecoulement  
T 6161-6-21 Etat d'aménagement 2a - Ecoulement  
T 6161-6-22 Etat d'aménagement 3a - Ecoulement  
T 6161-6-23 Niveaux d'eau et cotes du fond

1.

Résumé

La géométrie appropriée des ouvrages de correction ne peut souvent pas être déterminée seulement par des calculs théoriques et à l'aide d'expériences. Ceci est surtout valable, si des courants à plusieurs dimensions se forment à cause des bifurcations, des obstacles et ouvrages dans le fleuve.

Dans un modèle hydraulique, les données naturelles et les ouvrages projetés peuvent être reproduits, de façon géométrique et dynamique analogues, et ensuite être examinés. En plus, la géométrie et la position des ouvrages peuvent être variées, tant que la solution la plus appropriée n'est pas trouvée.

Pour le fleuve Sénégale, des modèles hydrauliques ont été exécutés dans la deuxième moitié de l'année 1978 par le "Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen" (Institut Franzius pour travaux hydrauliques et génie civil côtier) de l'Université de Hanovre, à l'échelle de 1:100 pour les longueurs, et de 1:25 pour les hauteurs, représentant:

- l'embranchement du Doué (PK 489),
  - la barrière rocheuse de Diawara (PK 793) et
  - le seuil rocheux de Tambounkané (PK 920 à 923).
- 
- Les vitesses du courant à la surface,
  - les niveaux d'eau et
  - les directions du courant
- ont été déterminés pour l'état naturel et plusieurs états d'aménagement.

(1) Embranchement du Doué (PK 489)

Les coûts pour les travaux d'aménagement du bras du Sénégal entre Leboudou-Doué et Vending pourraient être réduits si le débit est réparti en faveur du bras du Sénégal. La possibilité de rétrécir le bras du Doué dans le secteur de l'embranchement par des ouvrages de correction a été étudiée dans le modèle hydraulique, pour augmenter ainsi le débit et la profondeur d'eau dans le bras du Sénégal.

Les essais ont montré qu'une augmentation efficace du débit ne peut pas être réalisée par des ouvrages de correction, si une circulation facile et sûre des bateaux locaux et des barges automotrices doit être maintenue entre les bras du Sénégal et du Doué. Une influence efficace exercée sur la répartition du débit ne serait possible que par un barrage avec une écluse, irréalisable pourtant pour des raisons financières.

Afin de stabiliser la position de l'embranchement et d'obtenir un écoulement plus facile du courant dans le bras du Doué, la solution 2a peut être exécutée. Celle-ci prévoit un panneau de surface sur la rive gauche en aval de l'embranchement et des épis sur la rive droite du Doué.

(2) Barrière rocheuse de Diawara (PK 793)

La voie navigable dans la région de Diawara est rétrécie par des roches et doit être rectifiée pour permettre une circulation sûre et sans obstacles. A cet effet, la presqu'île et l'îlot doivent en partie être supprimés. La modification de la direction et de la vitesse d'écoulement qui en résulte, a été étudiée

dans le modèle. On a pu observer que, par la suppression des obstacles, les conditions du courant sont considérablement améliorées pour la navigation. Le percement devrait être parallèle à la direction du courant et son fond devrait être à +8,0 à 9,0 m IGN. La construction de digues n'apporte aucun avantage notable, si bien qu'on peut y renoncer.

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

Ce seuil est caractéristique pour le secteur rocheux en amont d'Ambidédi. Le large lit du fleuve est dû à la présence du fond rocheux, qui empêche un renforcement du lit. Lors de faibles débits, l'eau se répartit sur toute la largeur du lit avec une faible profondeur.

Il est prévu d'approfondir d'abord le fond de ce secteur pour une profondeur à aménager de 1,9 m. Etant donné qu'une augmentation ultérieure de la profondeur par approfondissement du chenal navigable est difficile et très coûteuse, et qu'elle ne pourra guère être exécutée par la Direction de la Voie Navigable, on a étudié dans le modèle la possibilité d'augmenter la profondeur d'eau par des ouvrages de correction. Les essais ont montré qu'une telle augmentation est en principe possible. D'autre part, les épis doivent être déjà disposés sur une section suffisamment longue, en aval du seuil, afin que le relèvement demandé du niveau d'eau dans le secteur du seuil soit atteint. Les vitesses du courant sont fortement augmentées par la construction des épis et atteignent 1,5 m/s. Etant donné que ceci est très défavorable pour la navigation et que les coûts des ouvrages de correction sont très élevés,

la réalisation par dragages d'un chenal navigable d'une profondeur de 2,4 m devrait être prise en considération.

Les essais sur modèles hydrauliques sont un complément indispensable de la simulation des écoulements sur modèle mathématique. Ils ont fourni des informations complémentaires précieuses tant hydrauliques que constructives. Les modèles réduits sont des instruments indispensables pour définir dès le début la bonne solution et éviter des investissements inutiles. C'est pourquoi il est vivement recommandé, de faire étudier ultérieurement sur modèle hydraulique les seuils difficiles de

- Goutioubé et
- Khabou.

Les frais qu'entraîne l'exécution des essais, sont facilement compensés par les économies relatives aux travaux de construction.

2. Bases générales pour les essais sur modèle hydraulique2.1 Généralités

Les bases pour les avant-projets élaborés dans le cadre de la Mission A.1.5 et ainsi pour les modèles hydrauliques sont, à côté des mesures topographiques, bathymétriques et hydrologiques, les résultats d'un modèle mathématique à une dimension. Les calculs du modèle mathématique comprennent le fleuve Sénégal entre l'embouchure du Doué (PK 244) et Kayes (PK 948) et le Doué (PK 0 à PK 228). Des détails en sont donnés dans le rapport relatif à la Mission A.1.4.

2.2 Limites des modèles

Les limites des modèles ont été déterminées selon les exigences des essais hydrauliques pour une reproduction des courants conforme à la nature. D'une façon générale, l'influence des ouvrages à étudier sur les niveaux d'eau, ainsi que sur la répartition des courants et des débits ne doit pas être sensible aux limites du modèle. En outre, ni l'influence du déversoir mobile qui règle les niveaux d'eau à l'extrémité aval du modèle, ni l'influence de l'alimentation en eau très turbulente, non conforme à la nature, ne doivent se faire sentir dans le secteur étudié proprement dit. De cette façon seulement, les conditions du courant analogues à la nature peuvent être simulées.

2.3 Echelles des modèles hydrauliques

Afin de pouvoir reproduire conformément à la nature l'écoulement turbulent du fleuve Sénégal pour des débits et des profondeurs d'eau relativement faibles, l'échelle des hau-

teurs devrait être de  $1 : n = 1 : 25$ . Vu la sensibilité des appareils de mesure, le niveau d'eau à l'état naturel peut être déterminé avec une précision de  $\pm 0,5$  cm.

L'échelle des longueurs et des largeurs a été choisie à  $1 : m = 1 : 100$ . La géométrie du modèle est ainsi distordue 4 fois par rapport à la profondeur.

Cette distorsion de la profondeur n'influence pas la conformité à la nature des courants dans le modèle, étant donné qu'elle est prise en considération dans les relations de similitude (lois du modèle).

## 2.4

Relations de similitude

Pour permettre une transformation des mesurages du modèle (niveaux d'eau et vitesses du courant) sur les conditions naturelles, la similitude des conditions de mouvement doit être obtenue en plus de la similitude géométrique du lit du fleuve. La similitude dynamique est obtenue lorsque les forces agissantes à tous les points analogues dans le modèle et dans la nature, se trouvent dans la même relation entre elles et montrent la même direction. Lors de la similitude géométrique et dynamique, les accélérations et vitesses aux points ayant une position analogue dans la nature et dans le modèle, auront alors également le même rapport entre elles.

Lors des écoulements à surface libre, les forces de gravité et d'inertie sont prédominantes aux forces de frottement et capillaires. A cet effet les valeurs du mo-

dèle peuvent être transformées avec une précision suffisante en valeurs de la nature à l'aide de la loi de similitude de Froude qui ne prend en considération que les forces de gravité et d'inertie et néglige les forces de frottement et capillaires.

Dans les modèles géométriquement analogues, les courants à surface libre, lors de l'utilisation de l'eau, se comportent de façon similaire à la nature, si le nombre de Froude est égal dans la nature et sur modèle:

$$Fr = \frac{v_N^2}{g \cdot l_N} = \frac{v_M^2}{g \cdot l_M}$$

où

$v$  = vitesse du courant en m/s

$l$  = longueur caractéristique en m

$g$  = accélération due à la pesanteur ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

Indice N = valeurs de la nature

Indice M = valeurs du modèle.

En raison des échelles des modèles choisies de 1 : 25 pour les hauteurs, et 1 : 100 pour les longueurs, les échelles de transformation s'obtiennent selon le tableau 2.4

Tableau 2.4: Echelles de transformation selon Froude

Données géométriques et physiques	Désignation Modèle : Nature	Echelle de transformation
Longueurs, largeurs en m	$l_M : l_N$	$1:m = 1:100$
Hauteurs, profondeurs en m	$h_M : h_N$	$1:n = 1:25$
Coupes transversales en $m^2$	$F_M : F_N$	$1:(m \cdot n) = 1:2\ 500$
Accélérations en $m/s^2$	-	1:1
Débits en $m^3/s$	$Q_M : Q_N$	$1:(m \cdot n^{1,5}) = 1:12\ 500$
Vitesses du courant en $m/s$	$v_M : v_N$	$1:n^{0,5} = 1:5$
Temps en s	$t_M : t_N$	$1:(m \cdot n^{-0,5}) = 1:20$
Pentes relatives	$J_M : J_N$	$1:(n \cdot m^{-1}) = 4:1$

Les valeurs numériques et les résultats des mesures du rapport sur les essais sont valables pour les conditions naturelles. Les valeurs relatives aux modèles sont indiquées par l'indice M.

## 2.5

### Documents pour la construction et l'opération des modèles

Pour la construction des modèles conforme à la nature, les documents suivants étaient disponibles:

- Plans 1:20 000,
- Plans 1:1 000 ou 1:2 000,
- Coordonnées du "talweg" digitalisé,
- Profils en travers 1:2 000 / 1:500 à la distance de 100 m,
- Profils en long du talweg et des bords de rive 1:20 000 / 1:100,
- Plans 1:1 000 et 1:2 000 des avant-projets pour l'aménagement et
- Plans 1:20 000 avec différents projets d'aménagement.

Les données hydrauliques suivantes mesurées dans la nature ou calculées dans le modèle mathématique étaient disponibles pour l'opération des modèles:

- Rapports sur les résultats des mesures hydrauliques du Groupement Lackner - Dorsch - Electrowatt exécutées dans le cadre de la Mission A.1.1,
- Résultats du modèle mathématique en ce qui concerne les valeurs de rugosité  $k$  selon Manning-Strickler, les débits, les vitesses moyennes des courants et les niveaux d'eau pour l'état naturel et pour différentes profondeurs à aménager,
- Résultats du modèle mathématique en vue de la répartition du débit Sénégal - Doué avant et après la régularisation.

## 2.6

Construction des modèles

Conformément aux documents indiqués, les profils en travers ont été construits sur des plaques en contreplaqué et posés dans un lit de sable préparé. La dis-

tance entre les profils était en général de 1,0 m dans le modèle correspondant à 100 m dans la nature. Entre les profils, le terrain a été modelé à l'aide d'une couche en béton de 4 à 6 cm d'épaisseur.

## 2.7

Appareils de contrôle et instruments de mesures

Les modèles ont été alimentés en eau d'un bassin à niveau constant. Les débits ont été mesurés en amont des limites des modèles à l'aide de déversoirs de mesure triangulaires étalonnés. Les épaisseurs de la lame déversante ont été mesurées électroniquement et contrôlées continuellement. La valeur du débit correspondant à la nature a été déterminée par des courbes d'étalonnage. Les niveaux d'eau à l'extrémité aval du modèle ont été contrôlés à l'aide de clapets de réglage mobiles conformément aux valeurs données par le modèle mathématique.

Pour l'évaluation de l'influence des différents travaux d'aménagement, les niveaux d'eau et les courants ont été mesurés dans les modèles à l'aide de palpeurs à pointe.

Les conditions du courant à la surface ont été déterminées par des photographies de corps flottants (vues aériennes prises à 5 m d'altitude). Le temps de pose a été choisi d'une telle façon, qu'une longueur de 6 cm de la voie du flotteur sur les plans corresponde à une vitesse du courant de  $v_0 = 1,0 \text{ m/s}$  dans la nature. La précision des mesures de vitesses est de  $\pm 0,01 \text{ m/s}$ .

2.8

Etalonnage des modèles réduits

Sur la base de la loi de similitude de Froude et en utilisant la formule d'écoulement de Manning-Strickler, il en résulte que la rugosité relative au modèle doit être plus grande que dans la nature, si l'échelle de la hauteur est plus grande que celle de la longueur, à savoir:

$$\frac{(k/h)_N}{(k/h)_M} = n^{-3}$$

où

$k/h$  = rugosité relative

$k$  = rugosité équivalente du sable selon Nikuradse

$h$  = profondeur d'eau

$n$  = facteur de surélévation ( $l_N/l_M$ ) :  $(h_N/h_M)$ .

La rugosité relative d'un fond de modèle en béton lisse est trop faible pour présenter la rugosité requise pour une reproduction des courants analogue à la nature. Pour augmenter la rugosité, des cailloux, du gravillon anguleux et du treillis en fil de fer ont été placés dans les modèles et ont été modifiés plusieurs fois jusqu'à ce que la ligne d'eau dans le modèle réduit corresponde à celle du modèle mathématique.

3. Exécution des essais sur modèle réduit3.1 Embranchement du Doué3.1.1 But des essais

En vue d'une réduction des coûts de l'aménagement du bras du Sénégal, il devrait être étudié dans le modèle, si le débit et ainsi la profondeur d'eau dans le bras du Sénégal peut être augmenté par des ouvrages de correction dans le secteur de l'embranchement du Doué.

Il fallait tenir compte à cet effet que la navigation sur le chenal navigable projeté du fleuve Sénégal ne soit pas gênée par les conditions modifiées du courant, et en plus qu'une circulation facile et sûre des bateaux entre le fleuve Sénégal et le Doué doive être possible.

3.1.2 Modèle et étalonnage

Conformément à l'art.2.2, les limites du modèle ont été fixées comme suit:

limite amont:	dans le fleuve Sénégal au PK 490,5	3 km
limite aval :	dans le fleuve Sénégal au PK 487,5	,7
	dans le bras du Doué au PK 226,8.	

Le point de la bifurcation du Sénégal et du Doué se trouve au PK 489,1 du bras du Sénégal et au PK 228,4 du bras du Doué, de sorte que les limites du modèle sont éloignées de cet endroit d'environ 1,5 km.

Pour la limitation latérale, les bras du fleuve ont été reproduits jusqu'à la ligne de hauteur de +9,0 m IGN.

La figure 3.1.2 montre le modèle d'essai avec les appareils d'opération et les échelles de façon schématique. La quote-part du débit du Doué a été mesurée à l'extrême aval du modèle.

Les hauteurs IGN sont basées sur le nivelllement trigonométrique, étant donné que ces essais ont été montés et exécutés avant le nivelllement de contrôle.

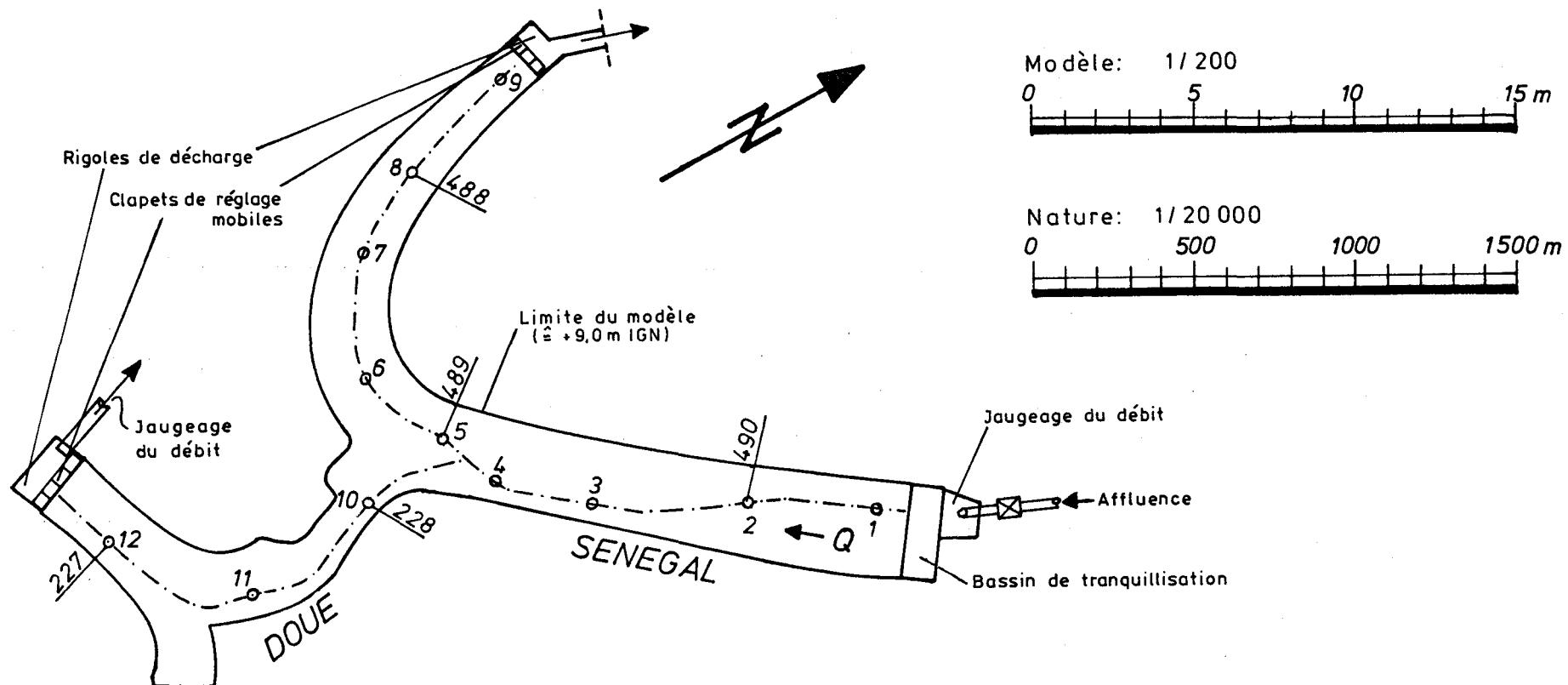


Fig. 3.1.2: Modèle de l'embranchement du Doué-Plan d'ensemble

Le modèle hydraulique a été étalonné pour l'état naturel, d'après les résultats du modèle mathématique.

La concordance des résultats des modèles hydraulique et mathématique est, dans le bras du Sénégal, très bonne, comme le montre le plan T 6161-6-1. (Différence  $\leq 1$  cm)

La répartition des débits sur les bras du Sénégal et du Doué de 56 et 44 % a pu être obtenue exactement dans le modèle.

La pente de la ligne d'eau mesurée dans le Doué sur le modèle hydraulique correspond à l'état naturel. La forte pente déterminée dans le modèle mathématique entre le PK 228,35 et le PK 228,0 du Doué, ainsi que la ligne d'eau qui monte par la suite, peuvent être expliquées par des tourbillons dans le Doué en aval du point de la bifurcation, qui ne peuvent pas être reproduites dans le modèle mathématique à une dimension. Dans le modèle hydraulique, ces tourbillons décollants avec les transformations de l'énergie y afférentes, se produisent tout naturellement, de sorte que le cours de la ligne d'eau dans le Doué, déterminé dans le modèle hydraulique, peut être considéré similaire à la nature.

Sur le plan T 6161-6-2 les conditions du courant sont représentées à l'état naturel.

En amont de la bifurcation, les courants sont essentiellement parallèles aux berges et atteignent des vitesses de 0,40 à 0,55 m/s. En aval, dans la courbe droite du fleuve Sénégal, les vitesses sont d'environ 0,40 m/s le long de la berge concave et de 0,55 à 0,60 m/s le long de la berge convexe.

Dans le Doué, les vitesses du courant sont d'environ 0,50 m/s. Des tourbillons se forment le long de la berge concave.

### 3.1.3 Solutions d'aménagement

#### 3.1.3.1 Solution d'aménagement N° 1

La solution d'aménagement 1, représentée sur le plan T 6161-6-3, a été choisie de plusieurs solutions de l'avant-projet, parce qu'elle s'est avérée, pour des raisons hydraulique et nautique, la plus réalisable.

Cette solution prévoit une digue écartant le courant de la rive gauche du fleuve Sénégal directement en amont de l'embranchement du Doué, et un panneau de surface en aval. Des épis ont été prévus dans le bras du Doué pour rétrécir la coupe transversale.

Après la construction des ouvrages de correction dans le modèle, le débit total s'est réparti comme suit:

- bras du Sénégal: 59,8 %
- bras du Doué: 40,2 %.

Ceci ne signifie pas une amélioration décisive en regard de l'état naturel avec  $Q_S : Q_D = 56 \% : 44 \%$ . L'objectif de faire couler 70 % du débit total, c'est-à-dire environ  $143 \text{ m}^3/\text{s}$ , dans le bras du Sénégal, n'a pas pu être atteint par cet ouvrage.

En respectant la profondeur et largeur minimales prévues pour la navigation sur le bras du Doué (profondeur

de 2,0 m, largeur de la voie navigable de 30,0 m), la variante 1a (plan T 6161-3) a été élaborée, d'abord sans prise en considération des conditions d'écoulement et de leurs influences sur le comportement des bateaux en manœuvre. La solution 1a diffère de la solution 1 par le déplacement du début de la digue à environ 160 m en amont du fleuve et de la partie à l'endroit de l'embranchement du Doué, qui écarte le courant, à environ 40 m de plus dans le fleuve Sénégal. La largeur du Doué à cet endroit a été rétrécie à environ 40 m par des ouvrages aménagés en aval. De façon complémentaire, des épis de fond ont été construits au PK 228,12 et au PK 227,92 du Doué (cote de la crête à +1,90 m IGN). Lors des niveaux d'eau du Doué supérieurs à +3,90 m IGN, la profondeur d'eau est de 2,0 m. De cette solution résultait également la plus grande redistribution du débit qui pouvait être atteinte par des digues et épis. Le débit du bras du Sénégal pouvait être augmenté à 63,8 %. Si les épis de fond dans le Doué ne sont pas réalisés, le débit proportionnel du Sénégal baissera à 61,4 %.

Sur le plan T 6161-6-4, les résultats des jaugeages du niveau d'eau de la solution d'aménagement 1a sont comparés à ceux à l'état naturel. L'augmentation du niveau d'eau est en amont de l'embranchement de 9 cm, et dans le bras du Sénégal en aval de l'embranchement de 6 cm. Ces augmentations sont, en comparaison des frais relatifs aux ouvrages, très faibles.

Dans le bras du Doué, le niveau d'eau tombe d'env. 3 cm.

Les vitesses du courant à la surface de 0,45 à 0,55 m/s augmentent dans le fleuve Sénégal à 0,60 à 0,70 m/s.

La pente de la ligne d'eau entre le PK 228,35 et le PK 228,0 du Doué augmente considérablement par les ouvrages. A l'état naturel, la pente de ce tronçon est de 0,1 o/oo et lors de la solution d'aménagement 1a de 0,4 o/oo (voir le plan T 6161-6-4). Les débits se déversant dans le Doué, produisent de forts courants transversaux dans le chenal navigable du Sénégal, qui gênent la navigation (voir le plan T 6161-6-5). Les conditions du courant gênent en outre la navigation sur le Doué.

Les résultats des essais sur modèle réduit relatifs aux solutions d'aménagement 1 et 1a peuvent être résumés de la manière suivante:

- Une redistribution considérable des débits s'écoulant dans les bras du Sénégal et du Doué ne peut pas être atteinte par des ouvrages de correction, comme digues et épis.
- L'élévation de la ligne d'eau à l'endroit de l'embranchement par une augmentation du débit est relativement faible dans le bras du Sénégal.
- Les conditions nautiques sont empirées par les ouvrages projetés non seulement dans le fleuve Sénégal, mais aussi dans le Doué.

#### 3.1.3.2 Solutions d'aménagement 2 et 2a

L'objectif principal de ces solutions a été la création de conditions favorables pour la navigation, en mettant à l'écart la demande d'une augmentation du débit dans le bras du Sénégal.

Pour atteindre cet objectif, un chenal navigable a été réalisé dans le fleuve Sénégal, et le banc de sable

dans le bras du Sénégal a été stabilisé sur une longueur d'environ 220 m par un panneau de surface. Le tronçon stabilisé dans le bras du Doué avait 80 m de long.

La solution 2 est représentée sur le plan T 6161-6-7.

Les niveaux d'eau mesurés dans la solution d'aménagement 2 du fleuve Sénégal correspondent, aux limites amont et aval du modèle, à peu près à ceux du modèle mathématique (plan T 6161-6-6). Dans le secteur immédiat de l'embranchement, les valeurs du modèle mathématique sont un peu inférieures (jusqu'à 2 cm environ) aux valeurs mesurées dans le modèle hydraulique. La répartition du débit total sur les bras du Sénégal et du Doué, de respectivement 57 % et 43 %, s'égalait à peu près dans les deux modèles.

Les conditions du courant selon la solution 2 sont indiquées sur le plan T 6161-6-7. Des modifications notables des vitesses du courant ne peuvent pas être constatées en comparaison avec l'état naturel.

Pour parvenir à un meilleur écoulement au milieu du fleuve pour la navigation dans le Doué, trois épis ont été réalisés le long de la rive droite du Doué et le panneau de surface a été prolongé jusque dans le Doué (solution d'aménagement 2a, plan T 6161-6-8). Par cette mesure, la formation de tourbillons à la rive gauche du Doué pouvait être en même temps supprimée (voir plan T 6161-6-7, solution 2). Par l'arrondissement de l'extrémité du panneau de surface, des conditions du courant plus tranquilles pouvaient en outre être obtenues. Des vitesses du courant légèrement élevées dans le Doué sont dues au rétrécissement de la coupe transversale au PK 228,0. Des inconvénients

en résultant pour la navigation, ne sont cependant pas escomptés par le meilleur écoulement du fleuve dans le chenal navigable du Doué.

### 3.1.4 Recommandation

En résumé, on peut constater que les meilleures conditions du courant du point de vue hydraulique et aussi nautique dans le secteur de l'embranchement résultent de la solution d'aménagement 2a. La solution d'aménagement 2a (plan T 6161-6-8) peut par conséquent être recommandée pour l'exécution.

3.2 Barrière rocheuse de Diawara (PK 793)3.2.1 But des essais

Dans la région de Diawara, une presqu'île rocheuse et un îlot rocheux doivent être partiellement supprimés pour créer un chenal navigable rectiligne et sûr. Le chenal doit être exécuté à cet endroit avec une largeur de 65 m au moins.

L'influence de ces travaux projetés sur les conditions du courant et les niveaux d'eau du fleuve Sénégal devait être évaluée dans le modèle hydraulique. En plus, la position des ouvrages de correction éventuellement nécessaires, comme épis, digues, etc. devait être déterminée.

3.2.2 Modèle et étalonnage

Les limites du modèle ont été fixées conformément à l'art. 2.2, à savoir:

limite amont: au PK 795,0

limite aval : au PK 792,0.

Les rocheux obstacles gênant la navigation se trouvent dans le secteur du PK 793,2 au PK 793,5. Les limites du modèle ont une distance d'environ 1,5 km du point à étudier.

Le niveau de 18,2 m IGN a été choisi comme limitation latérale du modèle.

La figure 3.2.2 représente le plan du modèle avec les installations et échelles.

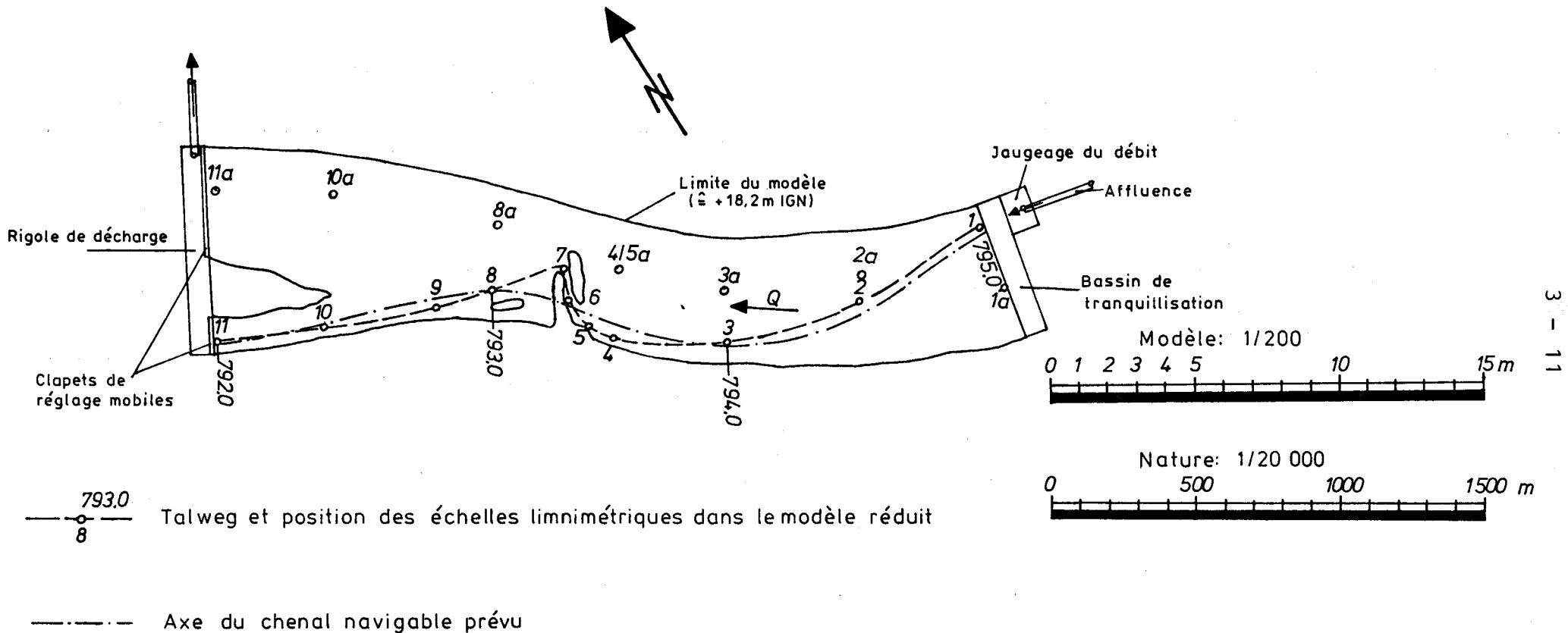


Fig. 3.2.2: Modèle de la barrière rocheuse de Diawara - Plan d'ensemble

Le modèle hydraulique a été étalonné selon le modèle mathématique. Le plan T 6161-6-9 montre la comparaison des niveaux d'eau du modèle mathématique avec le modèle hydraulique à l'état naturel. Entre le PK 793,5 et le PK 793,0, une pente plus forte que dans les parties de modèle voisinentes en amont et en aval, s'est formée dans le modèle hydraulique, divergeant du modèle mathématique. Ceci est dû au fait que le passage étroit dans le secteur des îles n'a pu être saisi que globalement dans le modèle à une dimension par la réduction du coefficient de rugosité de  $k = 37$  à  $k = 30$ . Dans le modèle hydraulique cependant, le rétrécissement a été reproduit en trois dimensions analogue à la nature. Les pentes de la ligne d'eau dans le modèle mathématique et le modèle hydraulique sont identiques sur tout le secteur considéré.

Sur le plan T 6161-6-10, les conditions du courant à l'état naturel sont représentées.

En amont du tronçon rocheux, les vitesses du courant lors de l'écoulement du débit de référence, sont de 0,55 à 0,65 m/s dans le secteur gauche du fleuve. Le fleuve encercle l'île rocheuse avec des vitesses du courant de 0,55 m/s au nord et presque 0,50 m/s au sud. En aval des roches, les vitesses du courant atteignent jusqu'à 0,70 m/s dans le secteur à droite. Directement derrière les roches, il y a un grand tourbillon avec des vitesses du courant jusqu'à 0,10 m/s. Près de la limite inférieure du modèle, le courant est dirigé vers la rive gauche sous un angle d'environ  $45^\circ$  et possède des vitesses jusqu'à  $v = 0,65$  m/s. Au PK 792,5 le débit est divisé par des alluvionnements de sable et se répartit sur les secteurs gauche et droit de la rive.

3.2.3 Solutions d'aménagement3.2.3.1 Solution d'aménagement 1

Les avant-projets relatifs à l'aménagement du seuil rocheux, avec la solution d'aménagement 1 en tant que projet principal, et les alternatives 2a et 2b sont représentés sur le plan T 6161-5-36 de la Mission A.1.5.

L'aménagement du fleuve Sénégal selon les alternatives 2a et 2b n'a pas été étudié dans le modèle, étant donné qu'il était évident qu'elles sont inférieures, surtout du point de vue économique, à la solution 1.

Selon la solution 1, le chenal navigable a été percé dans la roche avec la largeur prévue et d'une cote de fond à +8,0 m IGN. Des parties de l'île qui se dresse dans le chenal navigable projeté, ont été également supprimées. Sur le plan T 6161-6-11, les conditions du courant sont représentées pour cet état d'aménagement.

La retenue est réduite par le dérochement des îles au secteur du chenal navigable projeté. Le courant en amont des roches se concentre sur le nouveau percement. Les vitesses du courant en amont des roches en seront un peu plus élevées qu'à l'état naturel.

La quote-part du débit au nord de l'île rocheuse est réduite. Le courant ne traverse plus le passage entre les îles rocheuses. Les vitesses du courant dans le chenal navigable sont de l'ordre d'environ 0,50 m/s.

La représentation des niveaux d'eau (plan T 6161-6-12) montre que la ligne d'eau en amont de la barrière baisse de 3 cm au maximum, c'est-à-dire de façon minimale en

regard de celle de l'état naturel. En aval du percement dans la roche, le niveau d'eau varie encore moins.

### 3.2.3.2 Solution d'aménagement 2

La solution 2 diffère de la solution 1 par des digues supplémentaires. Les plans T 6161-6-12 et -13 montrent, que les conditions du courant dans le chenal navigable ne varient guère par les ouvrages en regard de la solution 1. Les vitesses du courant sont un peu inférieures que dans la solution 1, le courant est par contre mieux dirigé dans le cas 1.

A cause de ces résultats obtenus, on peut renoncer aux ouvrages de correction.

### 3.2.3.3 Solutions 3 et 3a

La solution 3 diffère de la solution 1 seulement par la cote du fond élevée à +9,0 m IGN.

Les conditions du courant de cette solution d'aménagement sont représentées sur le plan T 6161-6-14. En regard de la solution 1, les vitesses du courant augmentent dans le secteur du chenal navigable, d'environ 15 % à 0,58 m/s, par suite de la réduction de la coupe transversale par la cote du fond plus élevée. De plus, la réduction de la capacité du percement entraîne une quote-part du débit plus considérable dans le secteur droit du fleuve. Le tourbillon en amont de l'île rocheuse est déplacé plus en amont. Entre les deux îles restées, le courant n'est que très faible.

## 3.3.2

Modèle et étalonnage

Les limites du modèle ont été fixées, conformément aux conditions décrites à l'article 2.2, de la manière suivante:

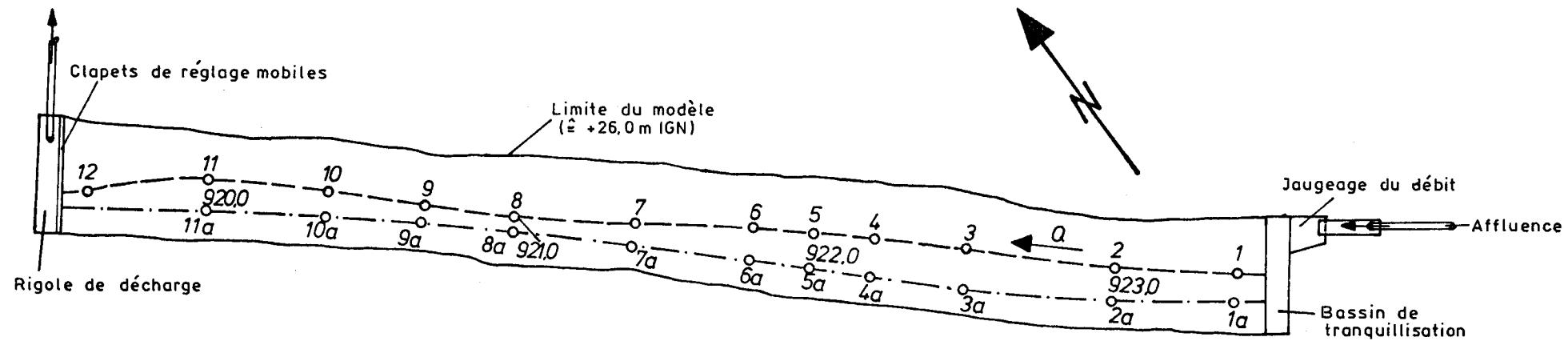
- limite amont: au PK 923,5
- limite aval: au PK 919,5
- limite latérale: +26,0 m IGN.

Une représentation schématique du modèle d'essais avec les appareils et les échelles, est donnée sur la figure 3.3.2.

Le secteur rocheux du seuil s'étend environ du PK 920,8 au PK 922,6. Les conditions du courant ont été évaluées sur un plus grand secteur du modèle, du PK 919,8 au PK 923,1.

Le modèle hydraulique a d'abord été étalonné selon la ligne d'eau calculée dans le modèle mathématique pour l'état naturel. La ligne d'eau pour le débit de référence de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  a été pratiquement identique après l'étalonnage dans les modèles hydraulique et mathématique (plan T 6161-6-17 et -19, ligne de l'état naturel). Les conditions du courant à la surface déterminées dans le modèle hydraulique, sont représentées sur le plan T 6161-6-18. Les vitesses sont de 10 à 15 % plus élevées que celles déterminées dans le modèle mathématique, étant donné que ce modèle indique des valeurs moyennes tandis que les vitesses du courant à la surface restituent presque les valeurs maximales.

Dans le secteur du seuil des vitesses du courant en amont du PK 922,6 jusqu'à 0,65 m/s et entre le PK 922,6 et le PK 920,8 jusqu'à 0,80 m/s existent. En aval du seuil (PK 920,8), les vitesses diminuent et n'atteignent que



—○— Talweg et position des échelles limnimétriques dans le modèle réduit

Modèle: 1/200



— — Axe du chenal navigable prévu

Nature: 1/20 000



Fig. 3.3.2: Modèle du seuil rocheux de Tambounkané - Plan d'ensemble

0,60 m/s au maximum. La répartition des vitesses sur la largeur du profil est relativement uniforme, même si les directions du courant ne sont pas toujours parallèles à l'axe du fleuve.

### 3.3.3 Aménagement du fleuve Sénégal dans le secteur du seuil rocheux

#### 3.3.3.1 Phase d'aménagement 1

Au cours de cette phase d'aménagement, le fond du chenal navigable a été placé de telle sorte que, conformément au cas 4 du modèle mathématique, une profondeur à aménager de 2 m soit disponible. De cette modification du niveau du fond résultait un abaissement du niveau d'eau dans le secteur du seuil de Tambounkané de 5 à 6 cm selon le modèle mathématique (voir plan T 6161-6-19, ligne "mod. math., cas 4"). Les divergences mesurées dans le modèle hydraulique (plan T 6161-6-19, ligne de la phase d'aménagement 1) sont de l'ordre de moins 1 cm et ainsi négligeables.

Les vitesses du courant (plan T 6161-6-20) dans le secteur du chenal navigable approfondi ont augmenté en regard de l'état actuel de 10 à 15 % et atteignent au maximum 0,80 m/s.

#### 3.3.3.2 Phase d'aménagement 2

Au cours de la deuxième phase d'aménagement, la profondeur d'eau dans le secteur du fond rocheux du PK 920,9 au PK 922,7, doit être augmentée de 2,0 m à 2,5 m par la réalisation des épis réduisant la coupe transversale. Déjà à partir du PK 919,8, des épis soutenant le niveau d'eau

ont été exécutés, pour avoir déjà une retenue au PK 920,9. Comme distance entre les épis, 100 m (solution 2) et 200 m (solution 3) ont été choisis. En amont du PK 920,9, les épis ont été exécutés à une distance de 700 m.

Comme il ressort du plan T 6161-6-19, les différences des lignes d'eau des solutions 2 et 3 sont négligeables ( $\leq 3$  cm). A l'extrémité inférieure du seuil, une retenue de 14 à 16 cm et à l'extrémité supérieure de 35 cm a été obtenue.

Les résultats montrent que l'effet souhaité peut être atteint à des frais moins élevés, par une plus grande distance entre les épis, mais que l'augmentation de la profondeur d'eau de 50 cm n'est pas obtenue. Ceci n'est possible que si également en aval du PK 919,8, des épis peuvent être réalisés pour soutenir le niveau d'eau. Dans le modèle, ceci a été simulé par le relèvement du clapet de réglage (solution d'aménagement 2a et 3a). Comme l'indique le tableau 3.3.3.2, la ligne d'eau pouvait en être relevée (plan T 6161-6-19).

Tableau 3.3.3.2: Relèvement de la ligne d'eau

Endroit	PK	Relèvement de la ligne d'eau en cm
limite inférieure du modèle	919,6	environ 41
extrémité inférieure du seuil	920,9	environ 51
extrémité supérieure du seuil	922,7	environ 61

Les champs d'écoulement, qui résultent du rétrécissement de la coupe transversale, sont représentés sur les plans T 6161-6-21 et -22. Il s'avère que la vitesse du courant, déjà existante localement, a été augmentée jusqu'à 1,5 m/s au maximum par la réduction de la coupe transversale.

### 3.3.4 Recommandation

Les essais sur modèle ont montré que la profondeur d'eau demandée peut être réalisée par des épis, si des épis sont disposés également en aval du seuil sur une section suffisamment longue.

Les vitesses du courant élevées jusqu'à 1,5 m/s (5,4 km/h) doivent cependant être considérées comme un inconvénient pour la navigation.

Etant donné que la construction d'épis entraîne des coûts élevés, la solution étudiée peut être recommandée seulement sous réserve. En tout cas, l'exécution d'un chenal navigable dragué, d'une profondeur de 2,4 m à 2,5 m, devrait également être prise en considération, comme déjà indiqué dans l'avant-projet.

---