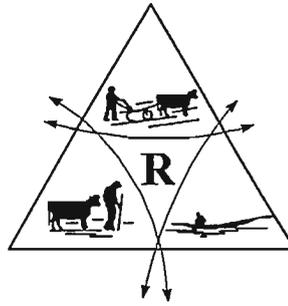




Institut de recherche
pour le développement

projet GIHREX
Département Milieux Environnement



LECOM

*Laboratoire des Eaux Continentales
au Mali*

Centre IRD
BP 2528
Quartier du Fleuve
Bamako (Mali)

Collection « *Etudes et Rapports Gihrex* »

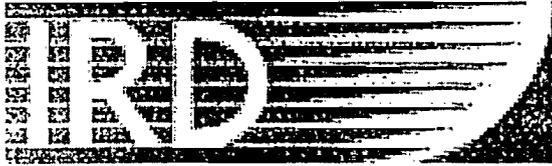
ETUDE HYDRAULIQUE DU RESEAU PRIMAIRE DE L'OFFICE DU NIGER

REACTUALISATION DES ABAQUES HYDROLOGIQUES DES OUVRAGES DE
REGULATION DES POINTS A ET B, MODELISATION HYDRAULIQUE DU FALA
MOLODO, FORMATION D'UN INGENIEUR DE L'OFFICE DU NIGER

M. KUPER, M. GREARD, A. HASSANE, A. MAHIEUX, B. MARIEU, D. ORANGE

Bamako, mai 2000

Référence n° ER55



Institut de Recherche pour
le Développement

LECOM
*Laboratoire des Eaux
Continentalles
au Mali*

RAPPORT DEFINITIF : TOME 1

ETUDE HYDRAULIQUE DU RESEAU PRIMAIRE DE L'OFFICE DU NIGER

REACTUALISATION DES ABAQUES HYDROLOGIQUES
DES OUVRAGES DE REGULATION DES POINTS A ET B

MODELISATION HYDRAULIQUE DU FALA DE MOLODO

FORMATION D'UN INGENIEUR DE L'OFFICE DU NIGER A CES TECHNIQUES

M. Kuper, M. Gréard, Hassane A., A. Mahieux, B. Marieu, D. Orange

BAMAKO, MAI 2000

1. RÉACTUALISATION DES ABAQUES DES OUVRAGES DE RÉGULATION DES POINTS A ET B DU RÉSEAU PRIMAIRE DE L'OFFICE DU NIGER.....	3
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 INSTALLATION DES ÉCHELLES ET NIVELLEMENT	4
1.3. ANALYSE DES JAUGEAGES ET DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES D'ÉCOULEMENT	8
1.4 CONCLUSION.....	10
2. MODÉLISATION HYDRAULIQUE DU PREMIER BIEF DU FALA DE MOLODO	11
2.1 INTRODUCTION.....	11
2.2 HYDROGRAMMES DANS LE PREMIER BIEF DU FALA DE MOLODO	11
2.3 SECTIONS EN TRAVERS.....	15
2.4 DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE HYDRAULIQUE.....	19
2.4.1 <i>Le logiciel</i>	19
2.4.2 <i>Construction du modèle du système du Sahel</i>	19
2.4.3 <i>Calage et validation du modèle</i>	21
2.5 RÉSULTATS	24
2.5.1 <i>Détermination de la capacité du Fala de Molodo par la modélisation</i>	24
2.5.2 <i>Calcul du temps de propagation de l'eau dans le système du Sahel</i>	25
2.6 CONCLUSIONS	26
3. FORMATION D'UN INGÉNIEUR AUX TECHNIQUES DE JAUGEAGE ET À LA MODÉLISATION	27
3.1 TECHNIQUES DE JAUGEAGE	27
3.2 LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE.....	27
RÉFÉRENCES.....	28
ANNEXE 1 : LISTE DES JAUGEAGES RÉALISÉS EN 2000 AU POINT A	29
ANNEXE 2 : ABAQUES ÉTABLIS.....	31
ANNEXE 3 : ALBUM PHOTO	38
ANNEXE 4 : LISTE DU PERSONNEL AYANT PARTICIPÉ À L'EXPERTISE	44
ANNEXE 5 DONNÉES DE TERRAIN POUR LE MODÈLE HYDRAULIQUE	45
ANNEXE 5.1 SECTIONS EN TRAVERS.....	45
ANNEXE 5.2 PRÉLÈVEMENTS DES ZONES DE L'OFFICE DU NIGER.....	48
ANNEXE 6 : PROGRAMME DE LA FORMATION EN MODÉLISATION HYDRAULIQUE	49

1. REACTUALISATION DES ABAQUES DES OUVRAGES DE REGULATION DES POINTS A ET B DU RESEAU PRIMAIRE DE L'OFFICE DU NIGER

1.1 Introduction

Le point A constitue le point de départ des trois canaux issus de la dérivation du Niger, en rive gauche, en amont de la retenue de Markala (Figure 1) :

- canal du Sahel et canal du Macina : 5 pertuis munis de vannes, de 4,50 m de largeur,
- canal Costes Ongoïba : 2 pertuis munis de vannes, de 5 m de largeur.

Le Point B constitue le régulateur à la fin du premier bief du Fala de Molodo et a comme objectif de rehausser le plan d'eau afin de permettre l'irrigation des zones de Niono et Molodo. Le régulateur a 3 pertuis munis de vannes, de 6 m de largeur. Les deux vannes extérieures peuvent être manœuvrées, mais la vanne du milieu est fermée et des batardeaux ont été mis en place pour éviter les fuites.

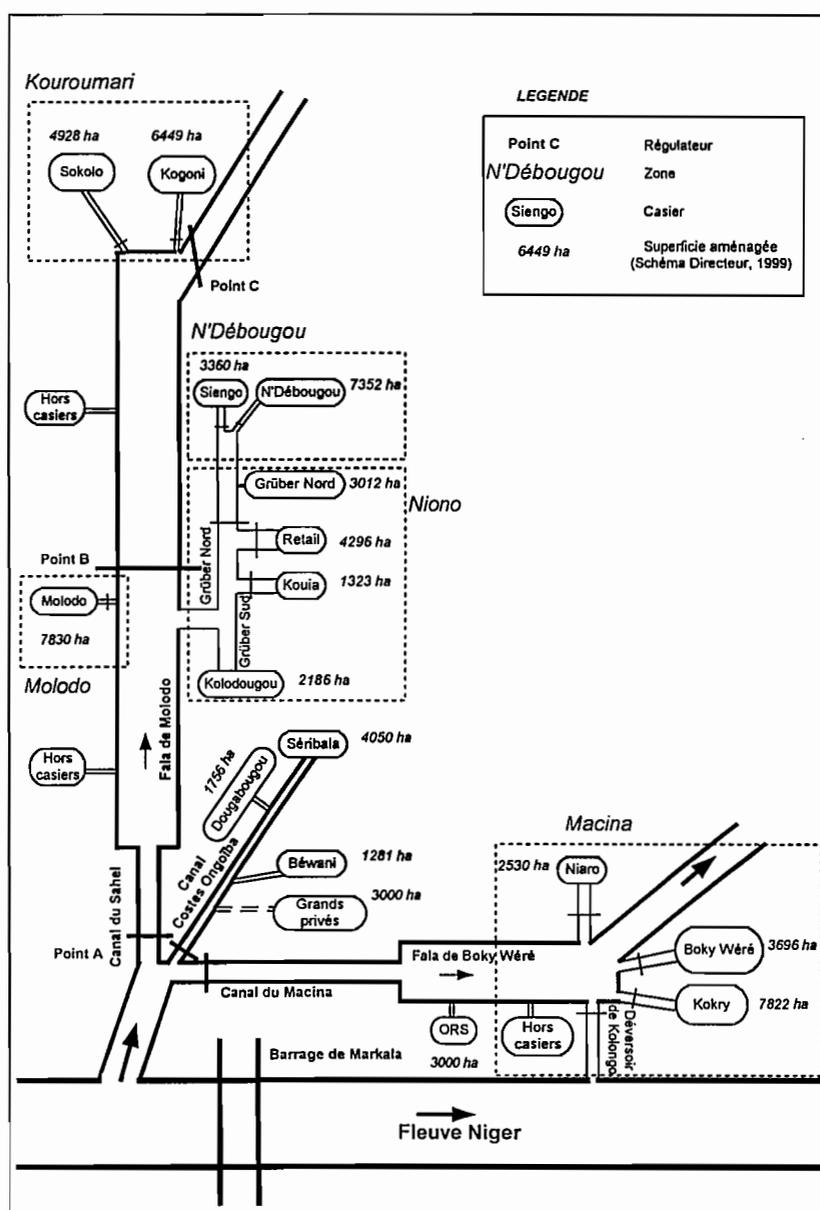


Fig. 1 : Schéma du réseau hydraulique d'irrigation de l'Office du Niger (échelle de distance non respectée).

Pour un pertuis muni d'une vanne noyée (cas des quatre ouvrages) la formule hydraulique dérivée de la formule de Chézy est de la forme :

$$Q = k.l. e.D^n \text{ avec}$$

- l largeur du pertuis
- e ouverture de la vanne
- k et n, les paramètres de forme et d'écoulement
- D (charge) = $H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}$

L'ouvrage de régulation du canal du Sahel avait fait l'objet d'un étalonnage en 1981 (Morell & Grandin). Le résultat de l'analyse de 34 jaugeages réalisés entre 1971 et 1981 avait donné comme résultats $n = 0,65$ et $k.l = 17,5$.

L'objet de la présente étude, commandée par l'Office du Niger, consiste en une actualisation des formules de tarage sur les trois canaux du Point A, ainsi que sur l'ouvrage du Point B. 33 nouveaux jaugeages ont été réalisés à cet effet en mars et avril 2000 (liste en annexe 1).

1.2 Installation des échelles et nivellement

♦ CANAL DU SAHEL

Le canal du Sahel est équipé d'anciennes¹ et de nouvelles² échelles (ancienne échelle en rive gauche RG ; nouvelle échelle en rive droite RD). Nous ne sommes intervenus que sur les éléments de la nouvelle échelle aval pour remplacer ceux qui avaient été détériorés, sans modifier le calage. Les éléments 9, 8 et 7 ont ainsi été remplacés.

Le nivellement³ de contrôle donne les lectures suivantes :

- repère SEG	1888	cote 300,45 m
- sommet nouvelle échelle (9)	2340	cote 300,00 m
- sommet ancienne échelle	2360	cote 299,97 m –mais lecture 300,10 m

Le 3 mars, hauteur d'eau (aval) lue à 9h00

- ancienne échelle H=297,62 m
- nouvelle échelle H=297,49 m hauteur réelle.

Pour l'échelle amont placée en rive droite et en bon état , nous avons constaté qu'elle n'a pas bougé
Son sommet est à la cote 302,00 m – c'est la seule échelle utilisée

Le 3 mars, hauteur (amont) lue à 9h00 H=300,45 m

¹ Les anciennes échelles sont des échelles en fonte, placées à la construction des ouvrages et appelées « échelles type Markala »

² Les nouvelles échelles émaillées ont été placées en 1981 (Morell et Grandin) ou en 2000 (Kuper et al., 2000).

³ La cote Office du Niger (ON) = la cote IGN + 18,70 m. Toutes les cotes sont données en cotes ON.

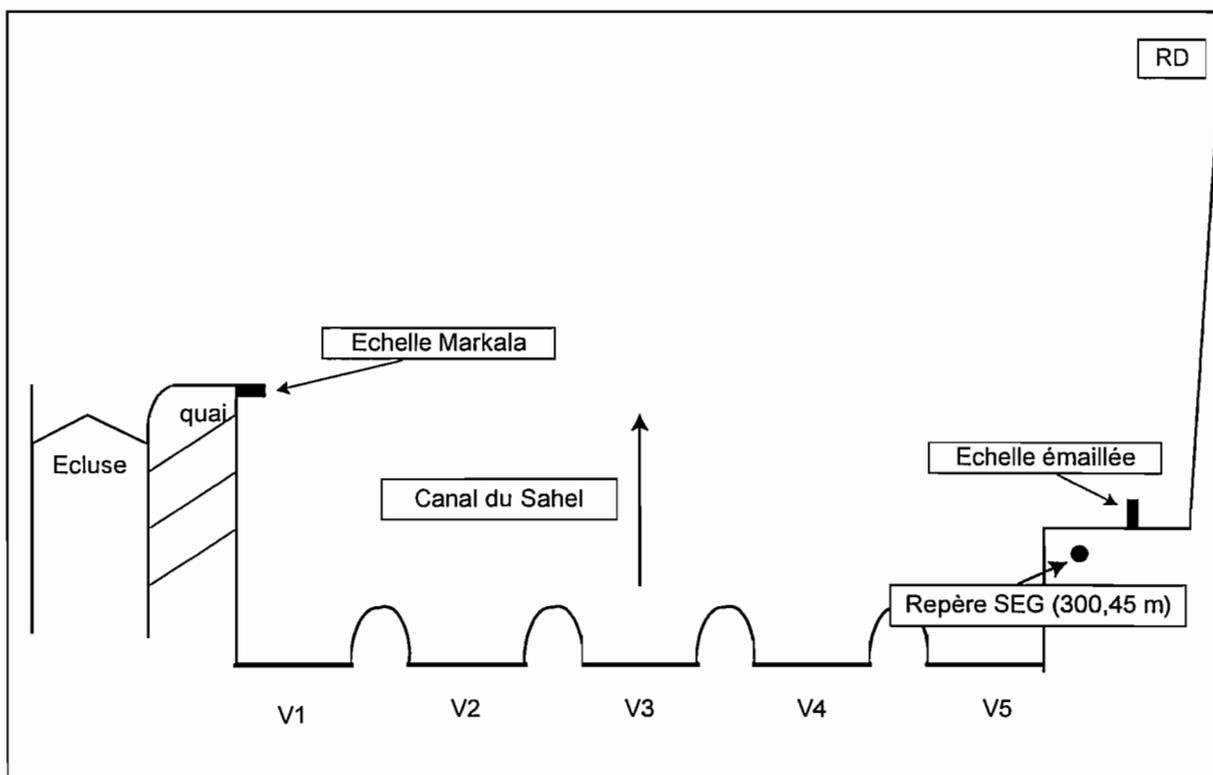


Fig. 2 : Ouvrage de régulation du Canal du Sahel au Point A. Plan d'ensemble

◆ CANAL DU MACINA

L'échelle aval existante est une ancienne échelle placée à l'extrémité du quai en RD. L'échelle est difficile à lire par son marquage et par les remous à l'ouverture importante des vannes. Le sommet de cette échelle est à la cote 300,00 m, mais lecture 300,10 m sur l'échelle.

Pour une lecture plus aisée, nous avons placé une nouvelle échelle aval comprenant deux éléments (8 et 9) sur supports en fer U, plantés dans la berge – anse calme protégée par l'écluse. L'élément supérieur - 9 – a son sommet calé à 300,00 m, il est rattaché à un repère SEG situé sur l'ouvrage en RG, coté à 300,50 m (selon nous)

Le nivellement de contrôle donne les lectures suivantes :

	1 ^{re} lecture	2 ^{me} lecture	
repère SEG	1513		Cote 300,50 m
sommet ancienne échelle	2010	2592	Cote 299,97 m – lecture 300,10
sommet nouvelle échelle		2562	Cote 300,00 m

Pour l'échelle amont, la hauteur utilisée est celle de la nouvelle échelle amont du canal du Sahel, le plan d'eau étant le même.

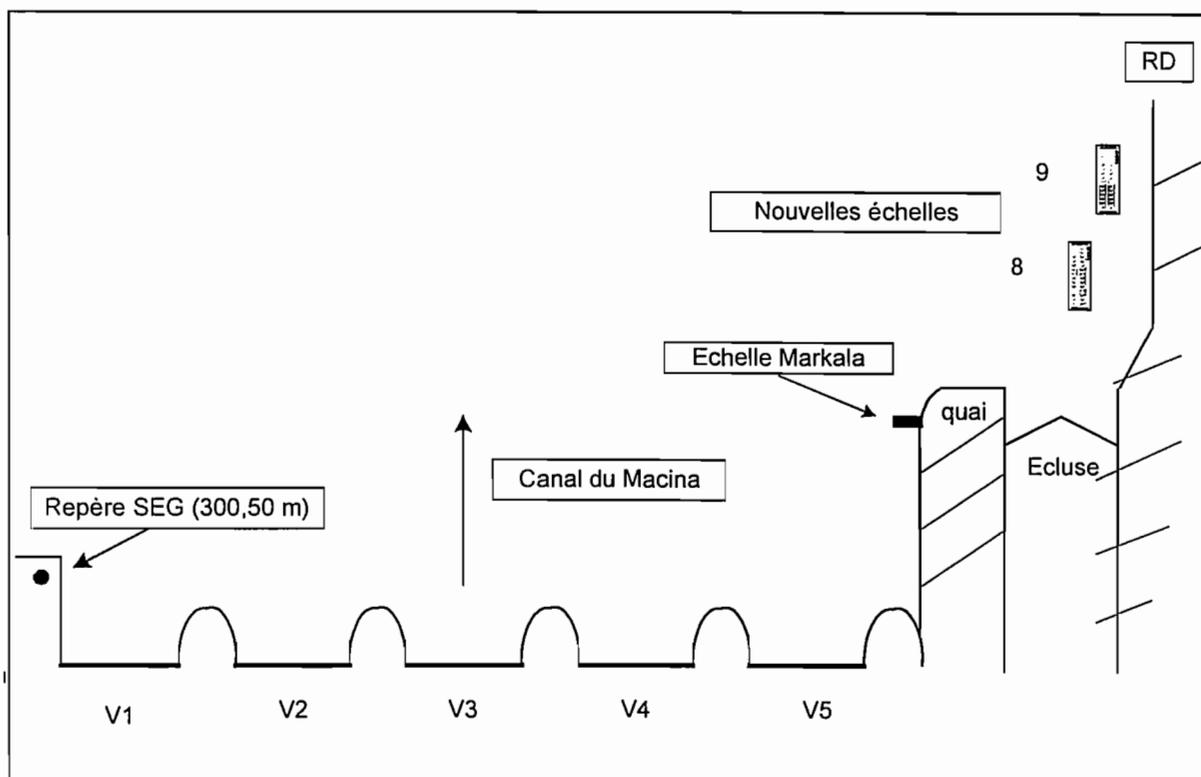


Fig. 3 : Ouvrage de régulation du Canal du Macina au Point A. Plan d'ensemble

◆ CANAL COSTES ONGOÏBA

Nous avons trouvé l'échelle aval immergée, les vannes largement ouvertes pour donner un débit en fonction de la demande des utilisateurs. Nous avons installé un élément émaillé (3) pour compléter l'échelle existant située immédiatement après l'ouvrage en RD. L'élément 3 est fixé sur un fer en U à 70 m en aval sur la RG en zone calme. La lecture au moment de l'installation le 1^{er} mars H= 300,30 m (lecture sur l'élément 330 cm). Le nivellement en prenant comme repère la tête du boulon fixé dans le trottoir devant les vannes a donné les résultats suivants :

- repère	0748	303,20 m
- sommet échelle aval	3940	300,00 m
- sommet échelle amont	2927	302,00 m

Le 3 mars : lecture à l'échelle aval H=298,39 m
 lecture à l'échelle amont H=300,43 m

N.B. le plan d'eau amont du canal Costes est considéré par l'ON comme étant à - 2 cm par rapport au plan d'eau du Canal du Macina et Canal du Sahel. Nous ne l'avons pas contrôlé, le rattachement Costes - Sahel n'a pas été fait par nivellement.

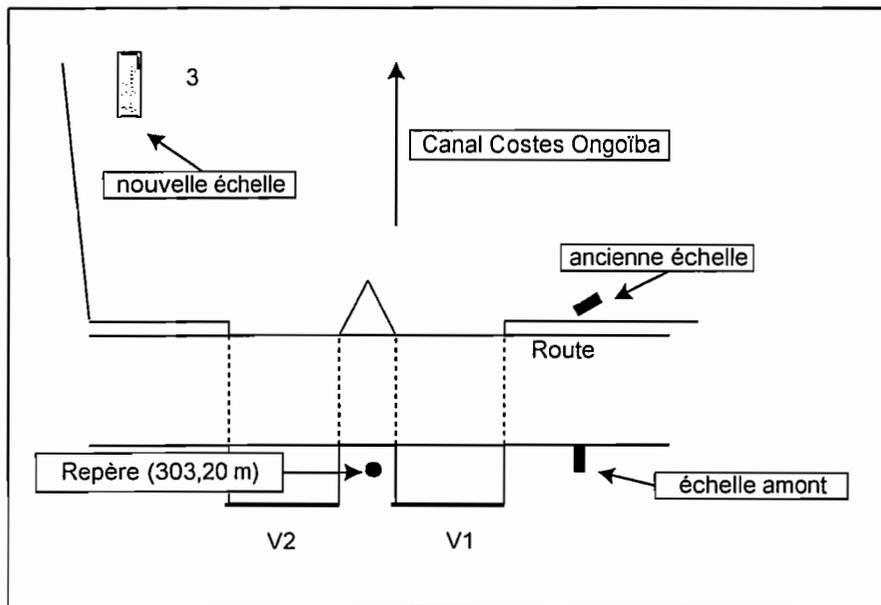


Fig. 4 : Ouvrage de régulation du Canal Costes Ongôïba au Point A. Plan d'ensemble

CANAL DU SAHEL – REGULATEUR DU POINT B

Au Point B nous avons vérifié l'état des échelles de lecture. Les échelles en amont comme en aval sont du type « Markala » et sont lues directement dans le système d'altitude de l'Office du Niger. Nous n'avons pas touché au dispositif actuel. Cependant, l'échelle amont est en mauvais état et la lecture n'en est pas aisée. Par temps de vent la lecture de l'échelle amont devient très difficile. Pour l'échelle aval, la lecture se fait sur l'échelle placée dans l'écluse, qui est à la même cote que celle placée à l'extrémité du quai aval (Figure 4). Le plan d'eau y est toujours calme.

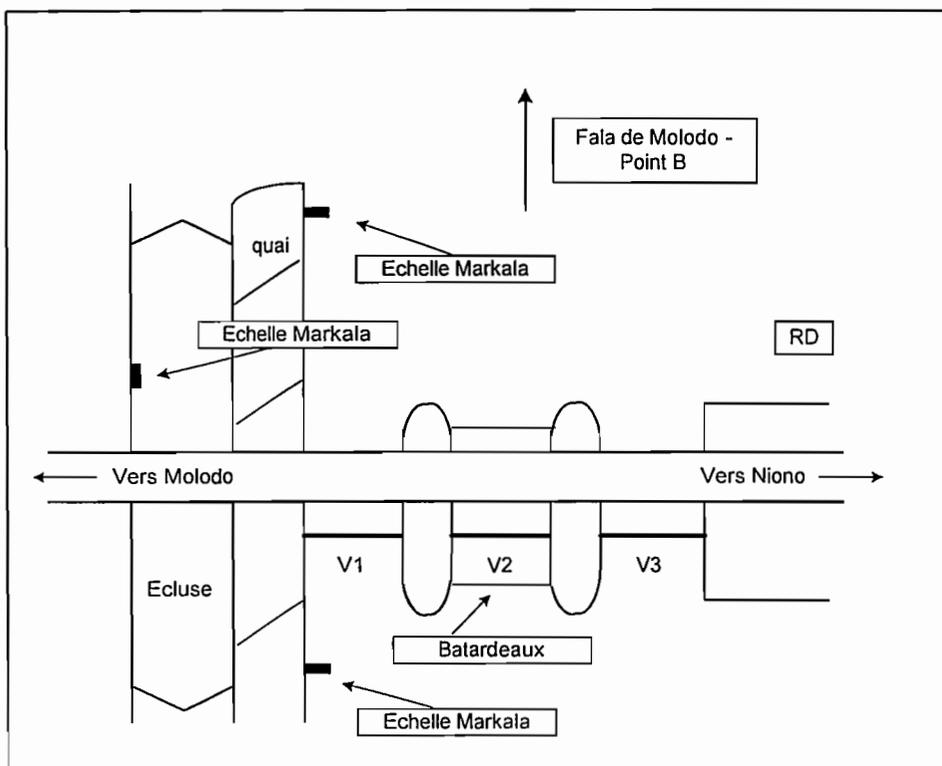


Fig. 5 Ouvrage de régulation du Fala de Molodo au Point B. Plan d'ensemble

1.3. Analyse des jaugeages et détermination des paramètres d'écoulement

Pour estimer les paramètres n et k , nous avons procédé par approximations successives jusqu'à déterminer la valeur de n qui minimise l'écart type sur le terme $Q/D^n \cdot e$. Une fois le paramètre n déterminé, le terme $k \cdot l$ s'obtient en calculant la moyenne des valeurs $Q_i/D_i^n \cdot e_i$ associées aux différents jaugeages. Cette méthode relève du même principe que celle dite « de la dénivelée normale » appliquée par Morell et Grandin (1981).

L'analyse des jaugeages aboutit aux résultats suivants pour chacun des trois ouvrages :

- canal du Sahel au Point A : $n = 0,65$ $k \cdot l = 17,2$
écart type entre débit mesuré et débit calculé 6,0 %
- canal du Macina : $n = 0,68$ $k \cdot l = 19,2$
écart type entre débit mesuré et débit calculé 6,7 %
- canal Costes Ongoïba : $n = 0,30$ $k \cdot l = 13,5$
écart type entre débit mesuré et débit calculé 10,5 %
- canal du Sahel au point B : $n = 0,49$ $k \cdot l = 17,7$
écart type entre débit mesuré et débit calculé 3,8 %

A noter que pour l'ouvrage du point B, le paramètre n correspond exactement à celui de la formule de Chézy (0,5).

Pour les canaux du Sahel et du Macina, théoriquement semblables, n est très proche du coefficient de Manning (0,67) présent dans la formule du même nom qui fait intervenir la pente de ligne d'eau et le rayon hydraulique comme facteurs explicatifs du débit.

Pour le canal du Sahel, la formule de tarage n'a pas changé depuis 1981 (paramètres n et k identiques à ceux obtenus par Morell).

Pour le canal Costes Ongoïba, la faiblesse du paramètre n s'explique par un ensablement important du canal en aval de l'ouvrage qui entraîne un soulèvement du plan d'eau et une diminution de la charge (ou dénivelée). A partir d'une certaine valeur de l'ouverture e , la dénivelée est très faible et le débit se stabilise autour de 6,5 m³/s.

Sur l'ouvrage du canal Costes Ongoïba, nous avons également expérimenté la méthode de la dénivelée normale⁴ en choisissant pour cette dernière la valeur $D_N = 0,5$. On obtient les résultats illustrés par les deux graphiques ci-dessous (figures 4 et 5).

⁴ Le qualificatif « normal » désigne en réalité une valeur courante, choisie arbitrairement.

Canal Costes - Etalonnage Q(e) pour D = 0,5 m

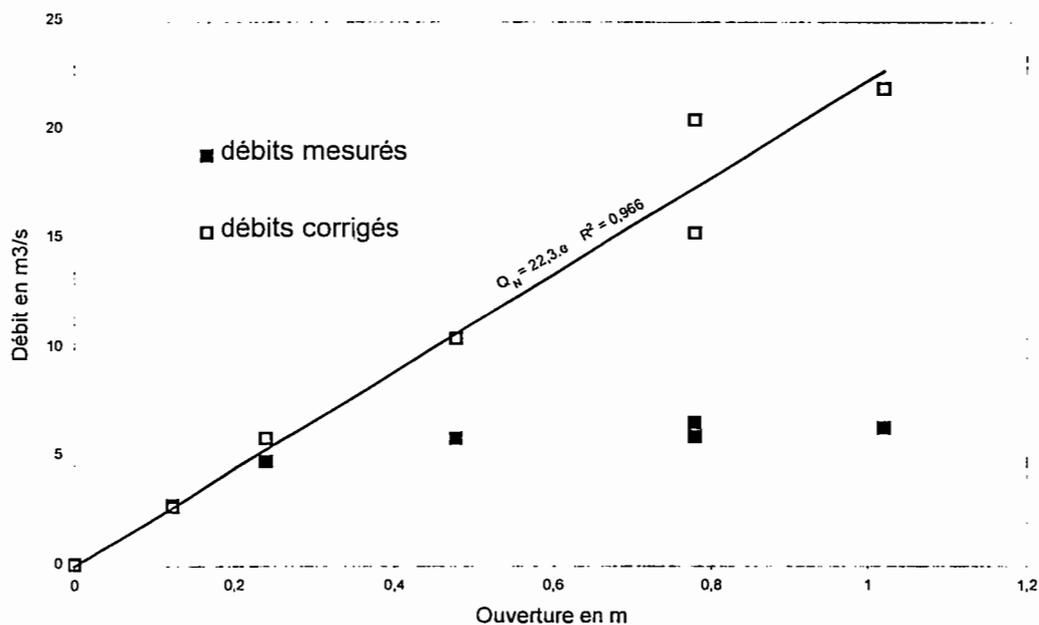


Fig. 6 : Canal Costes Ongoiïba : étalonnage à dénivelée normale

Courbe de correction des débits

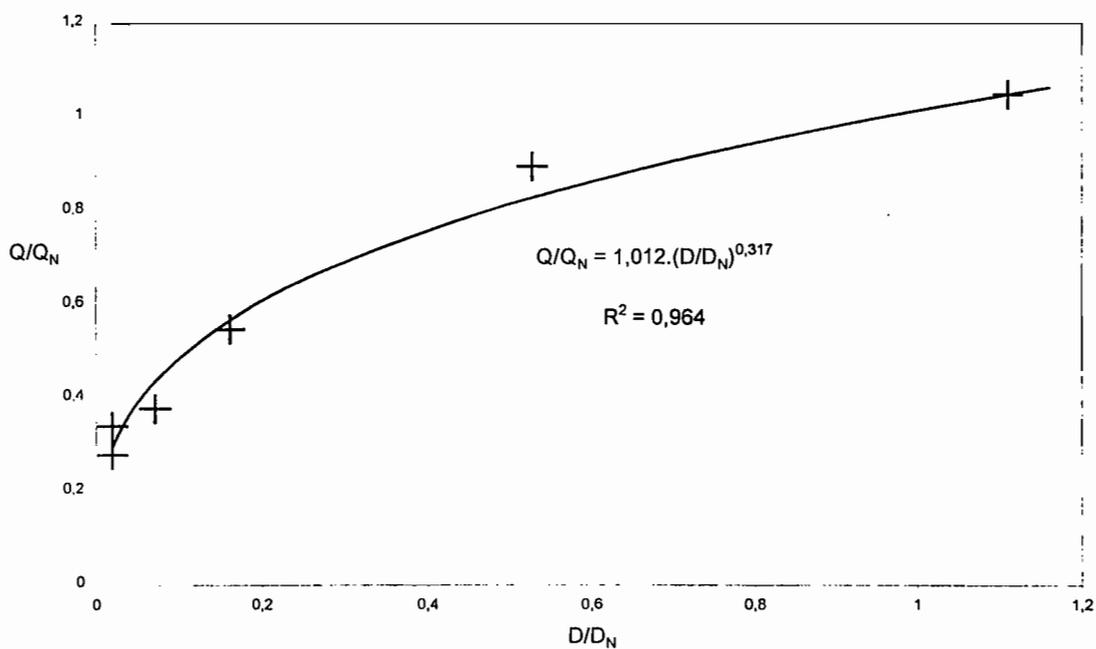


Fig. 7 : Canal Costes Ongoiïba : fonction de correction des débits

On obtient comme relation finale avec cette méthode :

$$\begin{aligned} Q &= 22,3.e.(D/D_N)^{0,317} \Leftrightarrow Q = 22,3/D_N^{0,317}.e.D^{0,317} \\ &\Leftrightarrow Q = 27,8.e.D^{0,317} \\ &\Leftrightarrow Q = 13,9.e.D^{0,317} \text{ (pour un pertuis)} \end{aligned}$$

Ces résultats sont très proches de ceux obtenus par approximations successives sur le facteur n.

1.4 Conclusion

L'analyse des jaugeages a permis l'établissement d'une formule d'étalonnage $Q(e,D)$ pour chacun des quatre ouvrages (les trois du point A et celui du Point B), Q représentant le débit d'un pertuis.

Canal du Sahel au Point A : $Q = 17,2.e.D^{0,65}$

Canal du Macina : $Q = 19,2.e.D^{0,68}$

Canal Costes : $Q = 13,7.e.D^{0,31}$

Canal du Sahel au point B : $Q = 17,7.e.D^{0,49}$

Pour le canal Costes nous avons pris pour valeurs de n et k.l, la moyenne des valeurs obtenues par les deux méthodes (approximations successives et dénivelée normale).

Ces résultats amènent plusieurs commentaires.

D'une part, l'analyse des jaugeages effectués sur le canal du Sahel montre que les conditions d'alimentation de ce canal au point A sont inchangées depuis 1981.

D'autre part, on constate que le canal du Macina présente des caractéristiques d'écoulement sensiblement différentes de celui du Sahel, bien que les deux ouvrages de régulation soient du même type.

Enfin, sur le canal Costes, l'écoulement est fortement perturbé par un comblement du lit en aval de l'ouvrage, ce qui se traduit du point de vue hydraulique par une diminution rapide de la charge lors de l'ouverture des vannes et une réduction considérable du débit maximal d'alimentation (6,5 m³/s, au lieu de 13 m³/s selon certaines sources⁵). Sur ce canal, il conviendrait dans le cas d'un dragage du lit du canal de réaliser par la suite de nouveaux jaugeages pour préciser la formule d'étalonnage de l'ouvrage de régulation.

Des abaques basés sur les équations ci-dessus ont été développés et sont présentés dans l'annexe 2.

Il est à noter, par ailleurs, que la mesure d'ouverture des vannes sur les ouvrages du Canal du Sahel et du Canal du Macina n'est pas affichée correctement aux tableaux électroniques et elle est lue avec imprécision à l'aide d'une tige graduée. Il est souhaitable d'installer un dispositif mécanique (type échelle ou mire) afin de remédier à cet inconvénient.

Les travaux de terrain pour les jaugeages et pour déterminer les sections en travers sur les canaux et sur le Fala de Molodo ont été faits au moyen d'un zodiac type Mark II. Cependant, la présence de souches et de branches pointues dans les cours d'eau nécessitent à notre avis une embarcation moins fragile, en plastic ou en aluminium.

⁵ E.g. Keita et al., 1999

2. MODELISATION HYDRAULIQUE DU PREMIER BIEF DU FALA DE MOLODO

2.1 Introduction

L'objet de ce travail est de simuler le comportement hydraulique du Fala de Molodo (système du Sahel) sur le premier bief par la modélisation hydraulique, pour répondre aux questions posées par le gestionnaire du réseau primaire installé à Markala, à savoir :

- quelle est la capacité de stockage dans le Fala de Molodo pour parer l'éventualité d'une pénurie d'eau ?
- quel est le temps de réponse entre le moment d'une opération au Point A et la réaction au Point B ?

La modélisation comprends six étapes :

1. Compréhension du fonctionnement hydraulique et définition des objectifs (chapitre 2.2),
2. La collecte de données : hauteurs d'eau, les débits entrants et prélevés, les ouvertures des vannes, les sections en travers (chapitre 2.3). Ces données doivent être collectées avec le plus grand soin, la qualité des résultats de la simulation en dépend,
3. La conception et la construction du réseau hydraulique qui doit être composé de nœuds, de biefs et de branches (chapitre 2.4.2),
4. Le calage du modèle qui consiste à rechercher à partir des paramètres quantifiables connus (débits, hauteurs d'eau) les paramètres dits de calage (coefficient de Manning/Strickler, coefficient de débit des ouvrages, pertes) par des calculs itératifs (chapitre 2.4.3),
5. La validation (vérification) qui consiste à obtenir par calcul les mesures observées pour une autre période de celle du calage, en utilisant les paramètres du calage (chapitre 2.4.3),
6. L'exploitation du modèle, construction de scénarios (chapitre 2.5).

2.2 Hydrogrammes dans le premier bief du Fala de Molodo

Pour comprendre le fonctionnement hydraulique du système du Sahel, nous avons mesuré les cotes horaires des plans d'eau pendant une semaine aux postes de mesure suivants : point A, point B, Molodo Nord et Centre, Kolodougou, Kouia, Retail et Grüber Nord. Ces données peuvent également être utilisées ultérieurement pour la modélisation hydraulique du Fala de Molodo.

La cote en amont du Point A a baissé de 15 cm pendant la période d'observation, à cause des forts débits donnés au Canal du Sahel, au Canal du Macina et au Canal Costes Ongoïba, et à cause d'un débit relativement faible à Koulikoro pendant cette période. On remarque dans la figure 8 la réaction immédiate, *i.e.* une baisse ou une hausse de la cote amont, suite à une opération sur les vannes d'un des ouvrages. Ceci est probablement lié à la capacité du canal adducteur, car on voit une stabilisation du niveau dans les heures qui suivent par une alimentation du stock d'eau en amont du barrage.

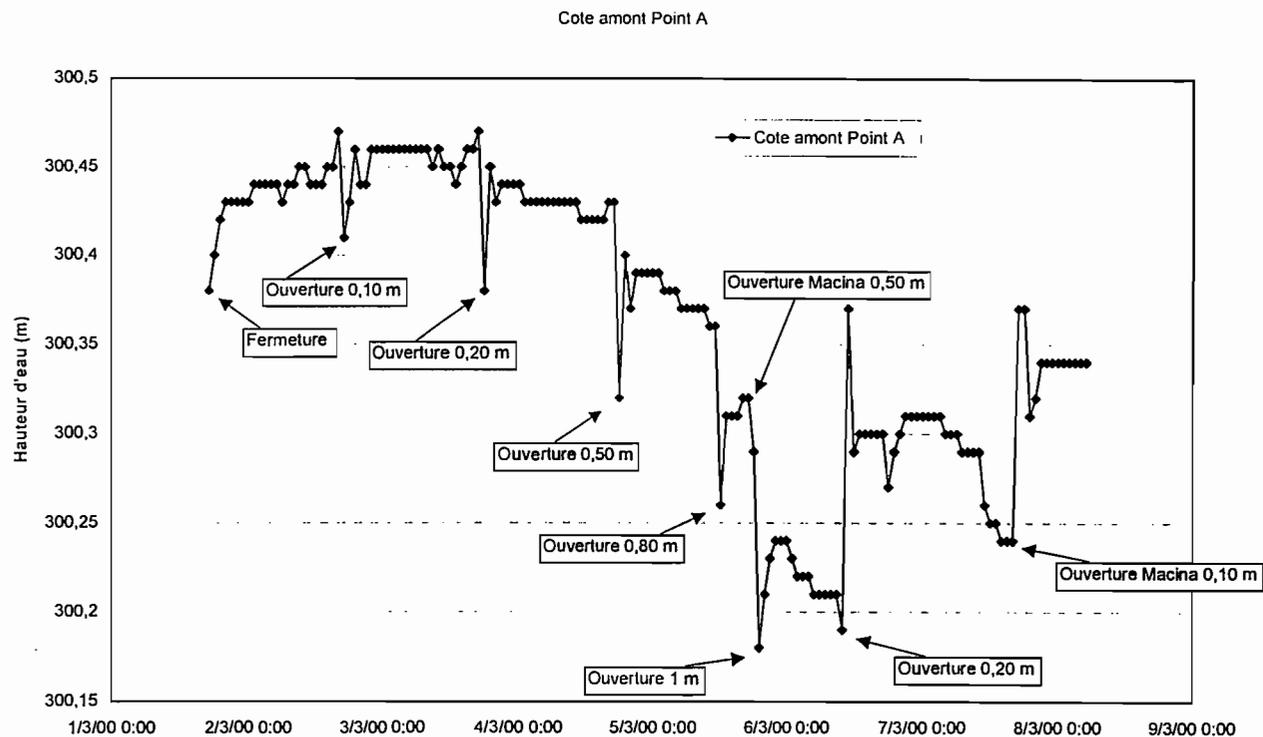


Fig. 8 : Cote amont du régulateur du Canal du Sahel au Point A du 1^{er} au 8 mars 2000.

Sur la figure 9, qui représente la cote en aval de l'ouvrage de régulation du Canal du Sahel, on remarque la réaction de la cote à l'ouverture/fermeture des vannes. Le 3 mars à 17.00 heures (cote = 297,50), par exemple, l'éclusier a ouvert les vannes de 0,10 m à 0,20 m. Le niveau d'eau en aval s'est stabilisé à 297,95 à 6.00 heures le lendemain, donc un temps de stabilisation de 13 heures. Cependant, la cote a atteint 297,90 déjà à minuit, donc 7 heures après la manipulation.

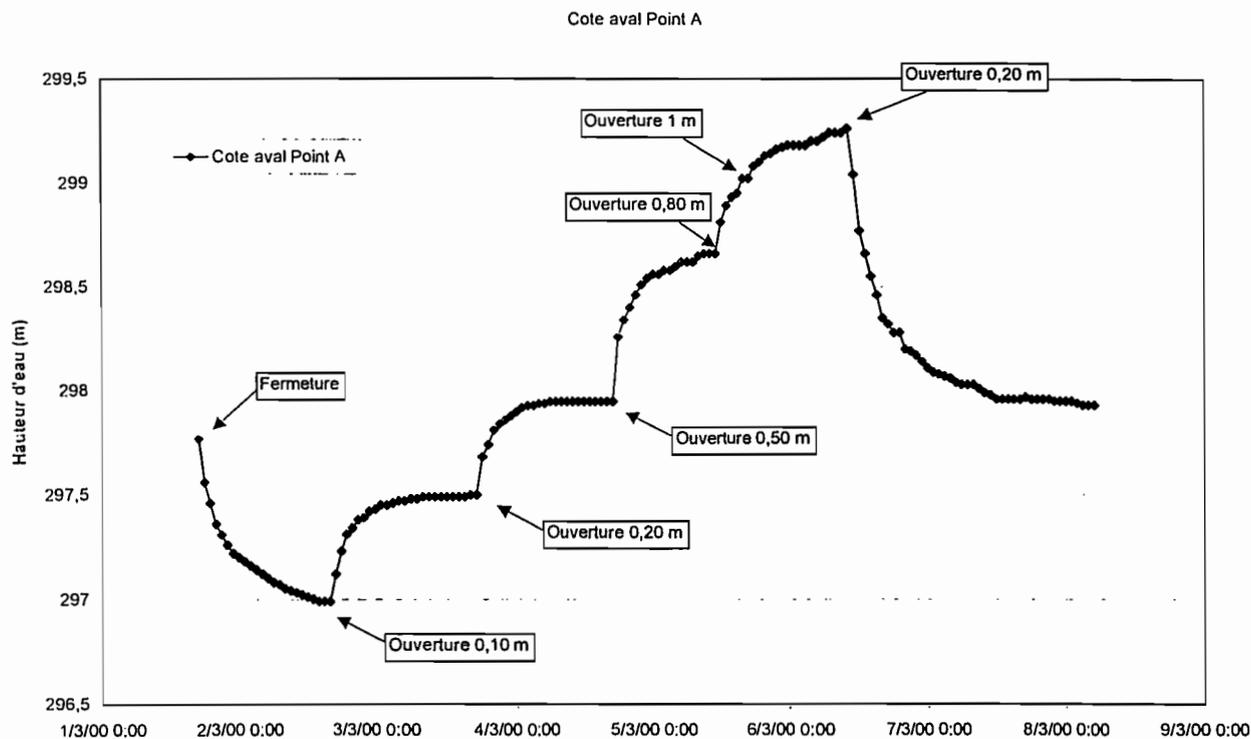


Fig. 9 : Cote aval du régulateur du Canal du Sahel au Point A du 1^{er} au 8 mars 2000.

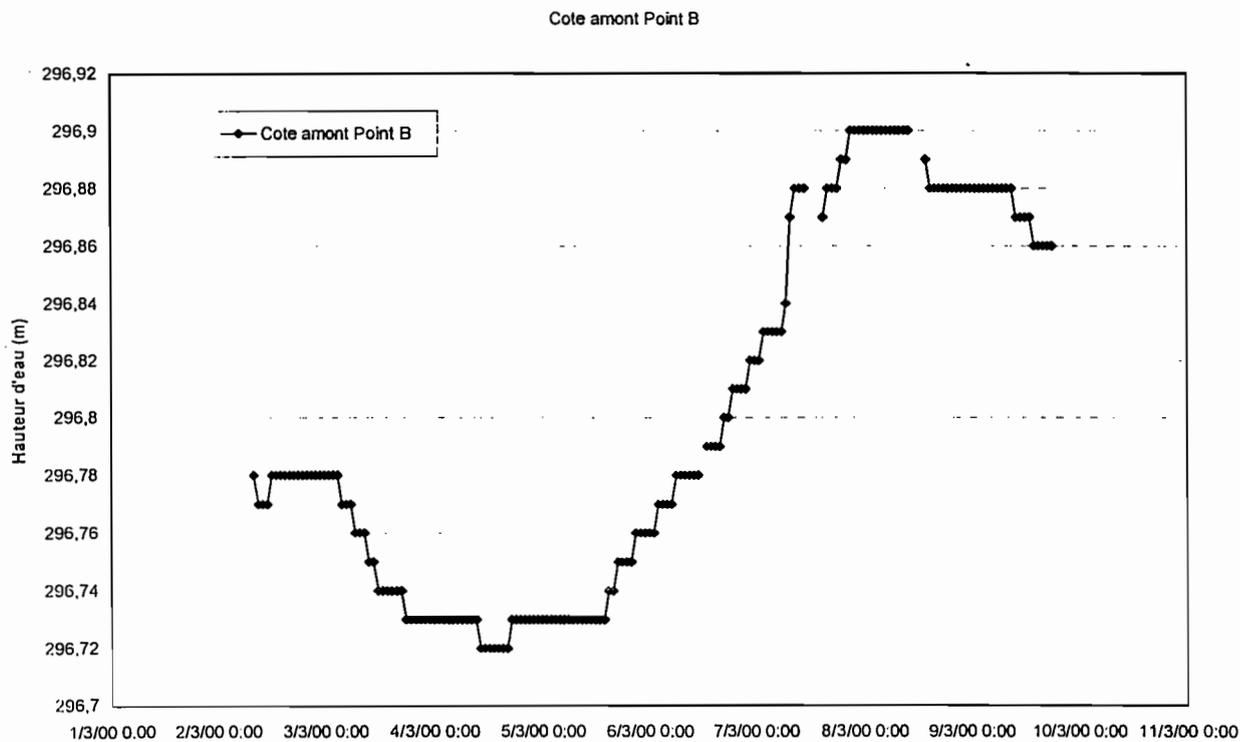


Fig. 10 : Cote amont du régulateur du Canal du Sahel au Point B du 2 au 9 mars 2000.

La cote en aval du Point B a très peu varié : il y a une différence de seulement 4 cm entre la cote maximale et la cote minimale pendant la période observée. Les deux vannes extérieures n'ont pas été manœuvrées et sont restées à 6 dents d'ouverture (24 cm) (celle du milieu est fermée).

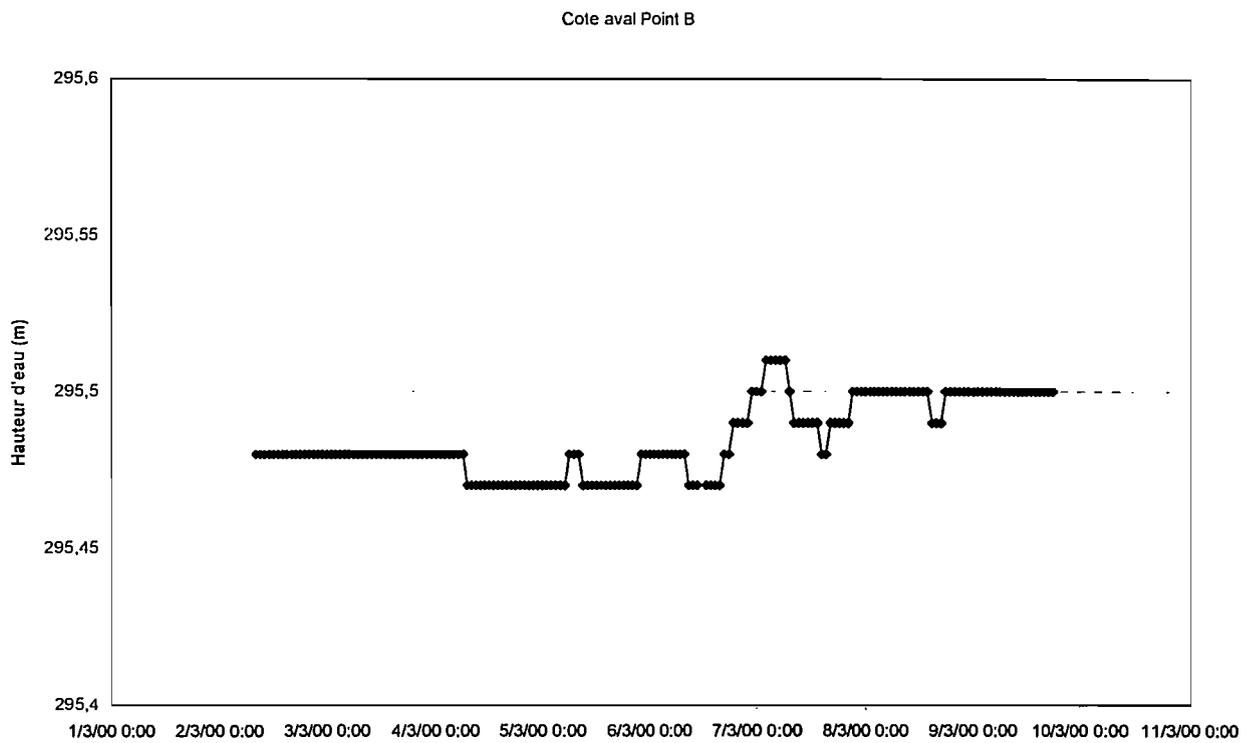


Fig. 11 : Cote aval du régulateur du Canal du Sahel au Point B du 2 au 9 mars 2000.

La comparaison entre le plan d'eau en aval du régulateur sur le Canal du Sahel au Point A et le plan d'eau en amont du régulateur au Point B donne déjà une idée du temps de propagation (figure 12).

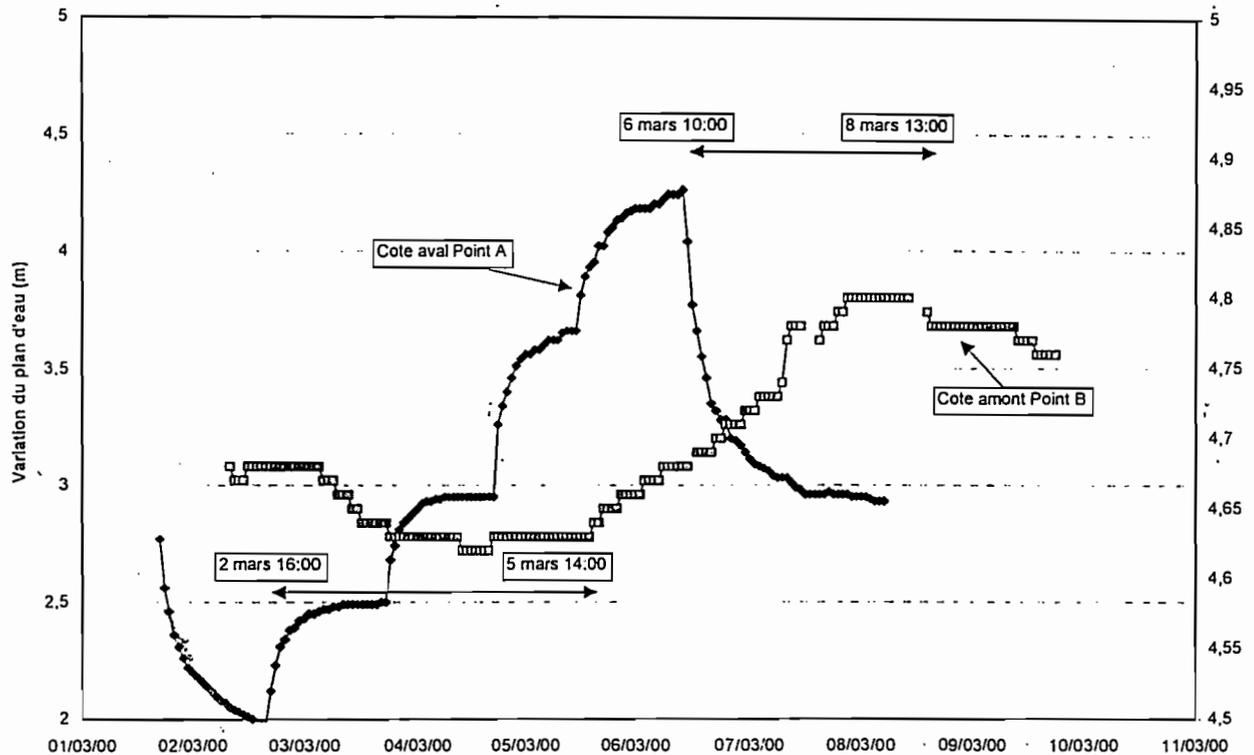


Fig. 12 : Cote amont du régulateur du Canal du Sahel au Point B du 2 au 9 mars 2000 en fonction de la cote aval au Point A.

On obtient un temps de réponse de 46 heures entre le temps de l'impulsion au Point A (le 2 mars à 16:00 heures) et le temps de réaction au Point B (le 5 mars à 14:00 heures) pour une cote à l'amont du régulateur au Point B de 296,73. Pour une cote à l'amont du régulateur au Point B de 296,90, le temps de réponse diminue à 27 heures.

2.3 Sections en travers

La modélisation hydraulique est conditionnée par la connaissance de la géométrie du canal à simuler. Il est nécessaire de disposer de données topographiques du canal en quantité et qualité suffisante pour initialiser le modèle. Les données comprennent :

- Profil longitudinal et sections en travers du canal du Sahel et du Fala de Molodo (daté 1948, avant la mise en eau du Fala de Molodo),
- 6 sections en travers sur le canal du Sahel et le Fala de Molodo (premier bief) entre le point A et le point B (mars 2000),
- 2 sections en travers sur le canal de Molodo et sur la branche de Niono (Grüber sud et nord : mars 2000).

La comparaison des profils anciens et actuels donne des informations intéressantes sur l'évolution du Canal du Sahel et du Fala de Molodo dans le temps. Cependant, dans l'absence d'une borne fixe pour chaque section en travers, il est parfois difficile d'attribuer la même origine à ces sections. Les données sont également présentées dans l'annexe 5.

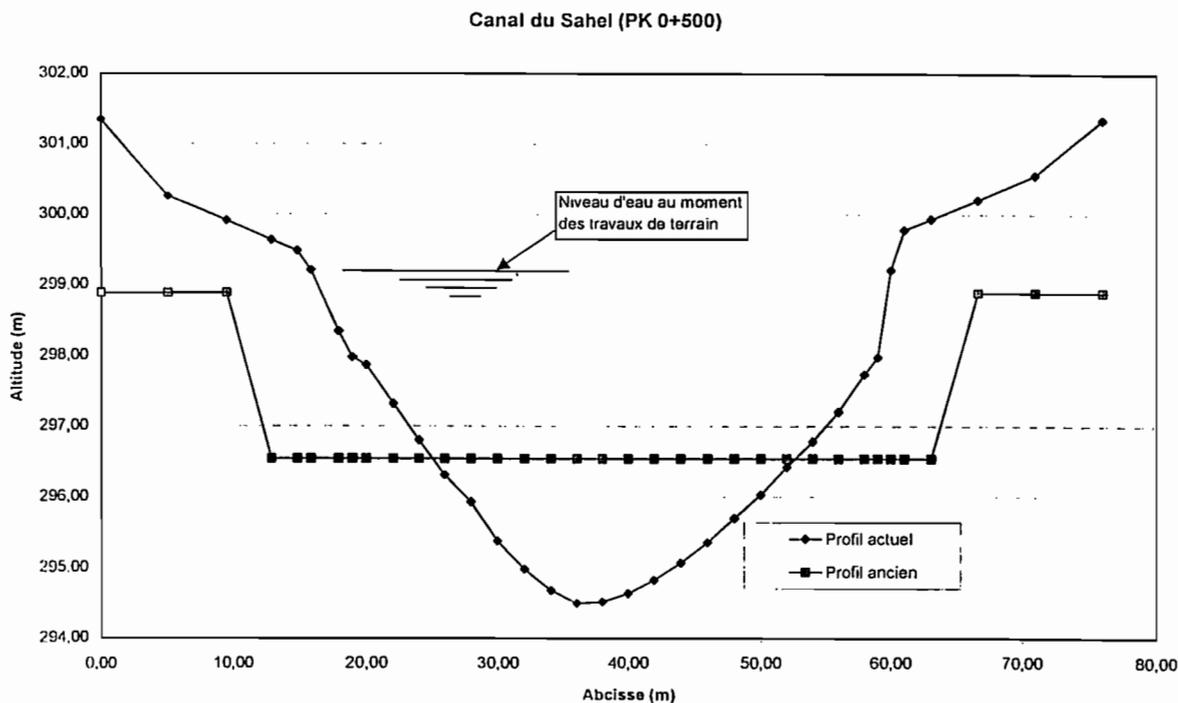


Fig. 13 : Section en travers au début du Canal du Sahel (PK 0 + 500).

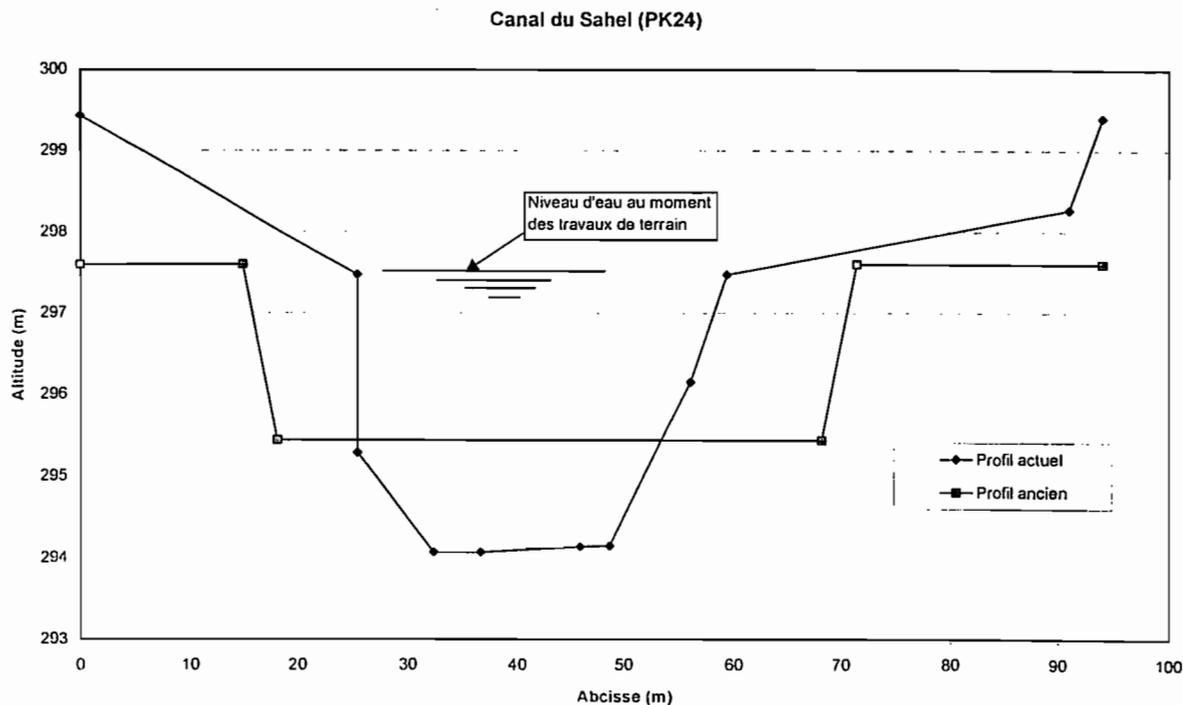


Fig. 14 : Section en travers à la fin du Canal du Sahel (PK 24)

On remarque le rétrécissement du Canal du Sahel à l'heure actuelle. Les sections se sont en même temps approfondies.

Fala de Molodo (PK39+619)

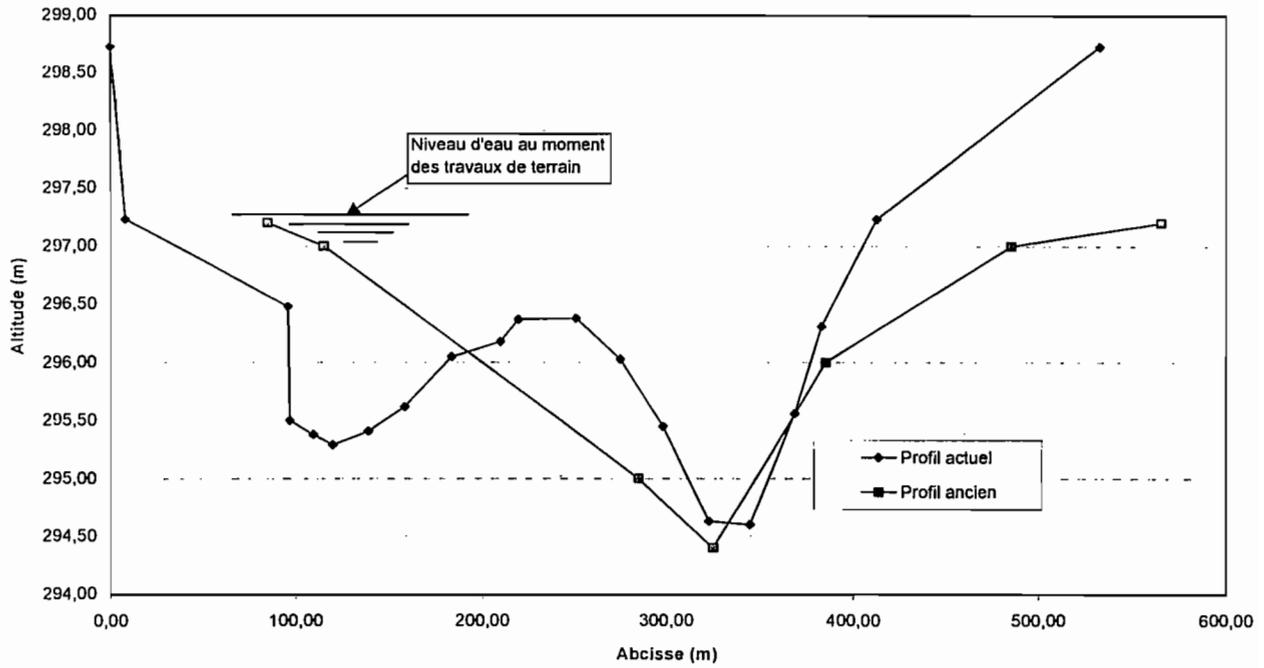


Fig 15 : Section en travers du Fala de Molodo au PK 39 + 619.

Fala de Molodo (PK41)

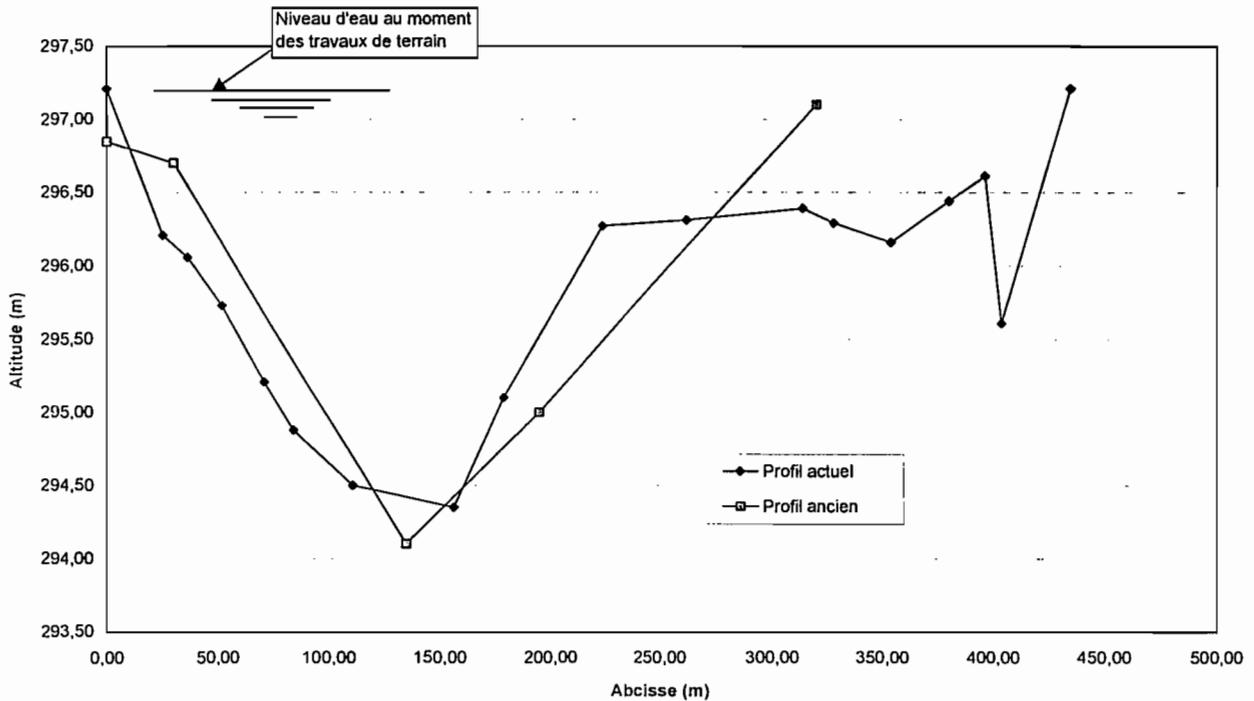


Fig 16 : Section en travers du Fala de Molodo au PK 41.

Les sections en travers sur le Fala de Molodo se sont en général élargies au fil du temps. Endigués sur une largeur limitée à l'origine, les digues se sont dégradées et ont souvent été réhabilitées en élargissant le lit.

Fala de Molodo (Prise Molodo)

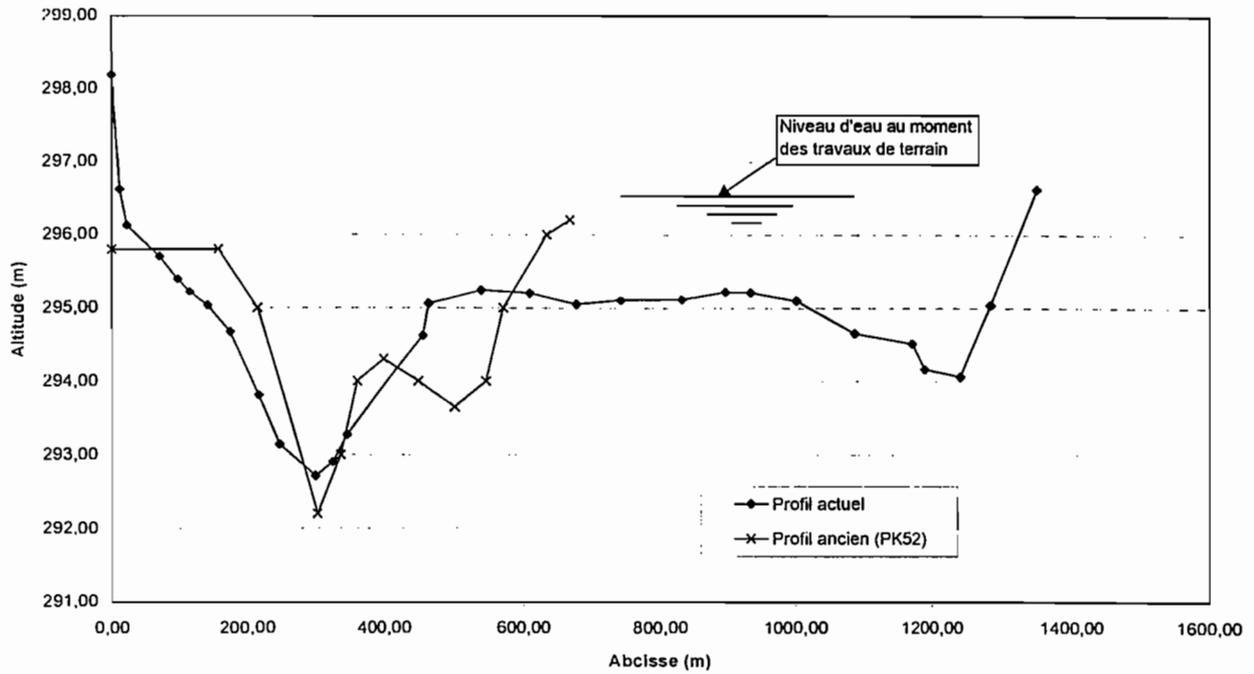


Fig 17 : Section en travers du Fala de Molodo au PK 77 (en face de la prise du canal de Molodo).

Fala de Molodo (aval Point B, PK79)

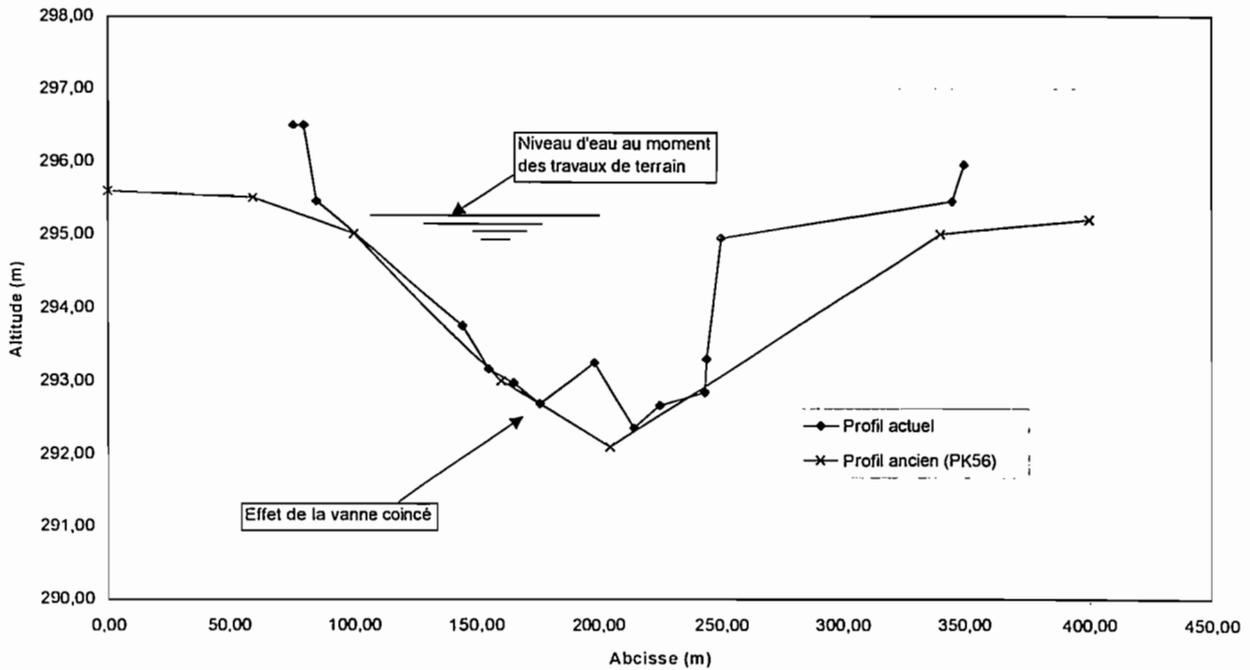


Fig 18 : Section en travers du Fala de Molodo au PK 79 (immédiatement en aval du régulateur du Point B).

2.4 Développement du modèle hydraulique

2.4.1 Le logiciel

Le logiciel SIC - Simulation des Canaux d'Irrigation - est un modèle mathématique qui permet de simuler le comportement hydraulique des canaux d'irrigation en régime permanent et transitoire. Mis au point par le Cemagref⁶, le principal objectif du modèle est de permettre une bonne représentation du comportement hydraulique du canal tout en ayant une interface utilisateur conviviale. Les principaux objectifs opérationnels du modèle sont d'évaluer l'influence d'éventuelles modifications du canal et ses ouvrages en vue d'améliorer et de maintenir la capacité d'un canal à satisfaire les objectifs de débit et de cote d'eau, et d'identifier à partir du modèle les règles pratiques de gestion opérationnelles des ouvrages de régulation en vue d'améliorer les procédures de gestion actuelles d'un canal.

Le modèle est élaboré autour de trois programmes informatiques principaux qui réalisent respectivement le traitement de la topographie, les calculs en régime permanent et les calculs en régime transitoire. Le modèle SIC est donc découpé en trois unités principales qui peuvent fonctionner aussi bien séparément que séquentiellement. L'Unité I est conçue pour créer les fichiers topographiques utilisés par les programmes de calcul des Unités II et III. L'Unité I permet à l'utilisateur d'entrer et de vérifier les données obtenues à partir d'un relevé topographique du canal (profil longitudinal et sections en travers) ou à partir des plans de conception.

L'Unité II est conçue pour effectuer les calculs en régime permanent. Elle permet d'étudier la ligne d'eau pour n'importe quelle combinaison de données de débits ou positions aux prises (ouverture, cote ou largeur de seuil, etc.) et d'ouvertures aux régulateurs. L'Unité II permet aussi de déterminer les ouvertures nécessaires des prises et des vannes réglables pour satisfaire un tour d'eau donné tout en maintenant simultanément un ensemble de consignes de cotes d'eau dans le canal.

L'Unité III est conçue pour effectuer les calculs en régime transitoire. Elle permet à l'utilisateur de tester les divers scénarios de tour d'eau, les manoeuvres sur les vannes de tête et les ouvrages de régulation. Démarrant à partir d'un régime initial permanent ou d'un régime transitoire calculé précédemment, elle aidera l'utilisateur à chercher la meilleure façon d'atteindre un nouveau tour d'eau. L'efficacité de la stratégie de gestion opérationnelle peut être évaluée au moyen d'un ensemble d'indicateurs de débits calculés aux prises.

2.4.2 Construction du modèle du système du Sahel

Le modèle du système du Sahel couvre :

- un canal artificiel qui part du régulateur du point A, de 24 km de long permettant de mettre en eau le Fala de Molodo,
- Le Fala de Molodo endigué sur une longueur totale de 55 km jusqu'au régulateur du Point B.

Les ouvrages de régulation, d'alimentation et de prélèvement d'eau sur le bief comprennent :

- Le régulateur du point A au point kilométrique 0 (PK 0), équipé de 5 vannes de 4,5 mètres de large pour alimenter le système du Sahel. La cote du seuil du régulateur est à l'altitude 295,00 m (cote Office du Niger).
- Les prises des particuliers dénommées « hors casiers » sont disposées de part et d'autre tout au long du Fala de Molodo. Pour la modélisation les hors casiers ont été regroupés en une prise unique dénommée hors casier et supposés se situer au PK 76.

⁶ SIC a été conçu et développé par la division Irrigation du Cemagref (Institut français de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) à Montpellier. La description du modèle SIC de ce paragraphe est basée sur le guide d'utilisateur du Cemagref. Pour plus d'information contacter : SIC@montpellier.cemagref.fr

- Les prises qui alimentent les zones aménagées de l'Office du Niger sont : la prise du canal de la zone de Molodo au PK 77 à Molodo en rive gauche et la prise du canal Grüber (PK 78) à Niono (dessert les zones de Niono et N'Débougou) en rive droite,
- Le régulateur du point B au PK 79, qui est équipé de 3 vannes de 6 mètres de large pour permettre le réglage du plan d'eau à l'amont et l'alimentation du Fala de Molodo en aval du Point B. La vanne du milieu est coincée et fermée par batardeaux. La cote du seuil du régulateur est à l'altitude 292,10 m.

Le système a été décomposé en quatre biefs en fonction des prélèvements considérés. Le premier bief va du PK 0 au point A, au PK 76, et alimente la prise hors casier à l'aval du PK 76. Le deuxième bief va du PK 76 au PK 77, il alimente la prise de Molodo au PK 77. Le troisième bief va du PK 77 au PK 78, il alimente le Grüber à l'aval du PK 78. Le dernier bief va du PK 78 au PK 79, et le régulateur du point B s'y situe à l'intérieur. Ce bief débouche sur le Fala de Molodo en aval du Point B.

Les sections en travers déterminées sur le terrain sont au nombre de neuf dont 6 sections entre le point A et le point B, une section à l'aval du point B et deux sections pour la prise de Molodo à Molodo et la prise du Grüber à Niono.

Premier bief a cinq sections aux PK 0+500, PK 24, PK 39+619, PK 41, et PK 76. Le deuxième bief a deux sections aux PK 76 et au PK 77. Le troisième bief a deux sections aux PK 77 et au PK 78. Le dernier bief au PK 78 et 79+100. Les sections aux PK 76 et 78 sont des sections très proches de la section 77 et sont donc considérées comme identiques. Les sections en travers ont été introduites en abscisse-cote pour constituer le cadre physique du canal à modéliser.

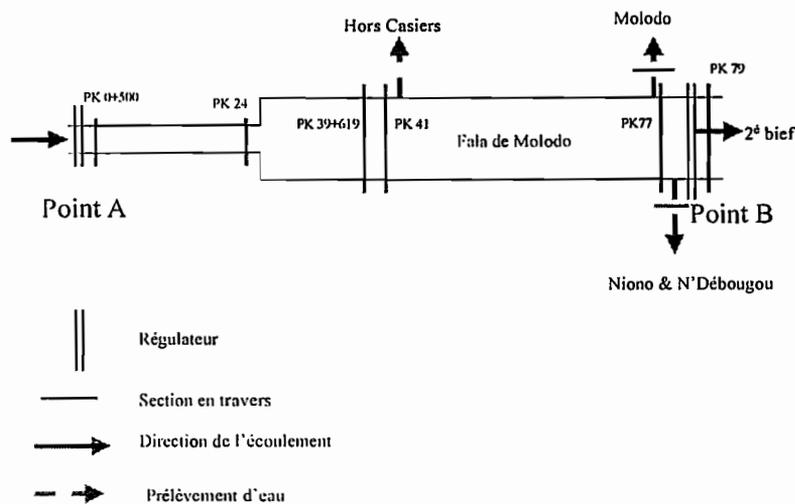


Fig. 19 : Schématisation du modèle hydraulique du Fala de Molodo

Dans le modèle hydraulique, il est nécessaire de définir une condition aval sous la forme $Q(h)$, h étant la hauteur d'eau à l'aval du régulateur au Point B. Dans un premier temps, nous avons utilisé les données obtenues pendant les jaugeages, car nous savions les débits fiables. Cependant, dans l'utilisation du modèle, nous nous sommes rendu compte que les débits étaient surestimés par rapport à la réalité. Ce phénomène s'explique par le fait que le débit à l'aval du régulateur au Point B dépend non seulement de la hauteur d'eau à l'aval, mais également de la perte de charge ($h_{\text{amont}} - h_{\text{aval}}$) et de l'ouverture des vannes.

La charge hydraulique saisonnière est variable au point B entre 2,1 m en crue et 1,8 m en étiage. Pendant la période de jaugeages (mars-avril 2000) la charge disponible était largement en dessous de la fourchette habituelle, i.e. entre 0,6 et 1,4 m, à cause d'un apport amont insuffisant. Pour obtenir un barème Q(h) nous avons calculé les débits (avec le nouvel étalonnage) pour les périodes de septembre 1998, décembre 1998 et janvier 1999. La régression linéaire effectuée sur les valeurs calculées donne les résultats satisfaisants et à permis d'établir pour la modélisation une condition aval adaptée, cf. figure 20.

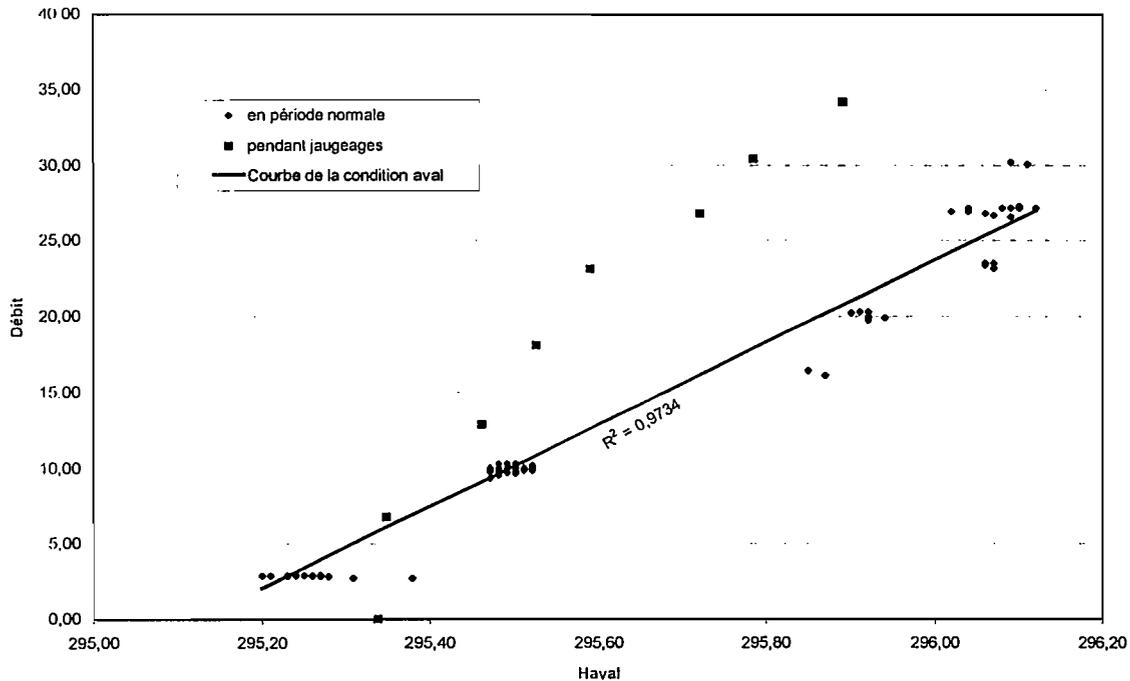


Fig. 20 : Ajustement de la courbe cote à l'aval du régulateur B – débit.

La figure 20 nous permet de définir la condition aval, Q(h), du régulateur au Point B comme suite :

Cote h (m)	295,10	295,25	295,50	295,86	295,92	296,08	296,10	296,5
Débit Q (m³/s)	0,1	2,9	10	17,5	20	27	30	40

2.4.3 Calage et validation du modèle

Pour le calage du modèle en régime permanent, nous avons retenu la période du 9 au 13 octobre 1998 avec un débit de 88,5 m³/s à l'entrée du canal du Sahel. Le calcul des débits a été effectué avec les nouveaux abaques établis dans ce rapport (Kuper et al., 2000). Cependant, il faut souligner qu'il n'est pas facile de trouver une période en dehors de l'étiage avec un débit relativement constant sur le système du Sahel. Les données disponibles pour cette période sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Données disponibles pour la période du 9 au 13 octobre 1998.

Données	Valeur	Unité
Débit entrant (Point A)	88,5	m ³ /s
Ouverture des vannes au Point A (5/5)	1,30	m
Débit sortant (Point B)	19,997	m ³ /s
Ouverture des vannes au Point B (2/3)	v1 = 0,575 v3 = 0,437	m
Pertes ⁷ (infiltration, évaporation)	137,46	l/s/km
Prélèvement des hors casiers ⁷	11,15	m ³ /s
Prélèvement de la zone de Molodo	4,85	m ³ /s
Prélèvement du Grüber (zones de Niono et N'Débougou)	41,63	m ³ /s

La simulation nous permet d'établir les paramètres de calage qui sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres de calage.

Paramètre	Valeur	Unité
Coefficient du débit au point A	0,66	-
Coefficient du débit au point B	0,50	-
Coefficient Strickler sur le canal du Sahel	39	m ^{1/3} /s
Coefficient Strickler sur le Fala de Molodo	15	m ^{1/3} /s

Les valeurs de coefficients de débits, qui pour des vannes en condition noyées sont en général de l'ordre de 0,6, semblent corrects et peuvent être vérifiées avec les résultats de jaugeages décrits dans le chapitre 1. Les coefficients de Strickler semblent également cohérents et correspondent pour le canal du Sahel à « un lit naturel propre à fond rugueux » et pour le Fala de Molodo à « un lit naturel avec végétation » (Jaccon, 1986).

La simulation donne des résultats satisfaisants, voir tableau 3.

Tableau 3 : Résultats de la simulation de calage

	Hauteur amont			Hauteur aval		
	H observée	H calculée	Ecart %	H observée	H calculée	Ecart %
Point A	300,38	300,39	0,2	299,68	299,68	0
Point B	297,15	297,15	0	295,92	295,92	0

NB: les écarts sont calculés par rapport à la cote du seuil du radier

Pour la vérification du modèle, nous avons pris la période du 12 au 20 juin 1998 avec un débit de 61 m³/s à l'entrée du système du Sahel. Les données sont résumées dans le tableau 4.

⁷ Obtenu à partir du bilan hydrologique (Hassane et al. 1999), égale 10,9 m³/s.

Tableau 4 : Données disponibles pour la période du 12 au 20 juin 1998.

Données	Valeur	Unité
Débit entrant (Point A)	61,0	m ³ /s
Ouverture des vannes au Point A (5/5)	0,60	m
Débit sortant (Point B)	21,2	m ³ /s
Ouverture des vannes au Point B (2/3)	v1 = 0,567 v3 = 0,648	m
Pertes ^b (infiltration, évaporation)	137,46	l/s/km
Prélèvement des hors casiers ^c	0	m ³ /s
Prélèvement de la zone de Molodo	4,5	m ³ /s
Prélèvement du Grüber (zones de Niono et N'Débougou)	24,5	m ³ /s

Nous avons gardé les mêmes valeurs des paramètres de calage (tableau 2).

La simulation donne des résultats suivants (tableau 5).

Tableau 5 : Résultats de la simulation de calage

	Hauteur amont			Hauteur aval		
	H observée	H calculée	Ecart %	H observée	H calculée	Ecart %
Point A	300,30	300,30	0	299,00	299,97	-0,75
Point B	296,95	296,87	-1,6	295,95	295,95	0

NB: les écarts sont calculés par rapport à la cote du seuil du radier

Ces résultats sont acceptables avec un écart maximum de 8 cm à l'amont du Point B, du probablement à un coefficient de débit du régulateur légèrement trop élevé.

Nous avons également vérifié le modèle en régime transitoire avec l'hypothèse d'une vanne ajustable au point B. En introduisant le coefficient de débit du point B à la valeur de 0,5, le modèle ajuste la vanne à une ouverture de 0,575 m qui correspond exactement à la valeur observée.

Pour vérifier la limite de validité du modèle, nous avons également testé le modèle pour un débit d'étiage très faible, i.e. pour la période du 8 au 13 mars 2000 avec un débit de 24 m³/s à l'entrée du système du Sahel. Les données sont données dans le tableau 6.

Tableau 6 : Données disponibles pour la période du 12 au 20 juin 1998.

Données	Valeur	Unité
Débit entrant (Point A)	24,3	m ³ /s
Ouverture des vannes au Point A (5/5)	v1=v5=0,10 ; v2 = v3 = v4 = 0,20	m
Débit sortant (Point B)	9,89	m ³ /s
Ouverture des vannes au Point B (2/3)	v1 = v3 = 0,243	m
Pertes ^d (infiltration, évaporation)	46,8	l/s/km
Prélèvement des hors casiers	0	m ³ /s
Prélèvement de la zone de Molodo	0	m ³ /s
Prélèvement du Grüber (zones de Niono et N'Débougou)	10,72	m ³ /s

On ne peut pas garder les mêmes valeurs en ce qui concerne les paramètres de simulation, le modèle n'est pas valable à ce débit. Nous trouvons des valeurs différentes, présentées dans le tableau 7.

^b En gardant la valeur du calage.

^c Obtenu à partir du bilan hydrologique (Ilassane et al. 1999), égale 3.7 m³/s.

Tableau 7 : Paramètres de calage.

Paramètre	Valeur	Unité
Coefficient du débit au point A	0,76	-
Coefficient du débit au point B	0,49	-
Coefficient Strickler sur le canal du Sahel	31	m ^{1/3} /s
Coefficient Strickler sur le Fala de Molodo	15	m ^{1/3} /s

On remarque une forte augmentation dans le coefficient de débit avec une diminution du débit et une diminution dans la valeur du coefficient de Strickler K pour le canal du Sahel.

En utilisant les paramètres donnés dans le tableau ci-dessus on obtient les résultats suivants (tableau 8).

Tableau 8 : Résultats de la simulation pour un débit entrant de 24,3 m³/s.

	Hauteur amont (m)			Hauteur aval (m)		
	H observée	H calculée	Ecart %	H observée	H calculée	Ecart %
Point A				297,92	297,94	-0,34
Point B	296,86	296,87	-0,21	295,50	295,50	0

NB: les écarts sont calculés par rapport à la cote du seuil du radier

2.5 Résultats

2.5.1 Détermination de la capacité du Fala de Molodo par la modélisation

Avec le simulateur SIC il est possible de déterminer la capacité du canal étudié. Ainsi pour déterminer la capacité de stockage du Fala de Molodo entre le point A et le point B il a été fixé trois cotes pour le point B, la cote 296,70 comme une cote minimale, la cote 297,10 comme cote moyenne correspondante à la cote de consigne et la cote 297,25 cote maximale d'octobre 1998. Une simulation à différents débits introduits au point A a produit les résultats suivants.

Tableau 9 : Simulation de la capacité de stockage dans le Fala de Molodo entre les régulateurs aux Point A et Point B.

	H _{amont} Point B en m	Volume en m ³ (Q= 24 m ³ /s)	Volume en m ³ (Q= 88,5 m ³ /s)	Ecart en %
Maximum	297,25	75 021 600	79 971 300	6,6
Moyen	297,10	70 346 800	75 340 100	7,1
Minimum	296,70	55 491 300	56 342 300	1,5
Ecart maximum-moyen en %		6,2	5,8	
Ecart moyen-minimum en %		21,1	25,2	
Ecart maximum-minimum en %		26,0	29,6	

Pour le volume V₁ compris entre la cote moyenne et la cote maximale, la réserve disponible pour l'irrigation est de 4,5 millions de m³. Pour le volume V₂ compris entre la cote moyenne et la cote minimale la réserve est de l'ordre de 19 millions de m³. Pour la réserve maximale comprise entre la cote maximale et la cote minimale V₃, elle est de l'ordre de 23,5 millions de m³.

Pour un prélèvement de 50 m³/s les volumes d'eau V₁, V₂ et V₃ peuvent respectivement supporter la demande pendant 1 jour, 4 jours et 5 jours. La capacité de stockage est donc considérable pour une gestion de l'eau quotidienne, mais insuffisante pour combler une période de déficit, telle que s'est produite pendant l'été 1999.

2.5.2 Calcul du temps de propagation de l'eau dans le système du Sahel

Nous avons simulé en régime transitoire une variation de débit au Point A pour déterminer la réaction au Point B. Nous définissons la différence entre le temps de l'impulse (t_i) au Point A et le temps de réponse (t_r) au Point B donc comme le temps de propagation. Nous avons fait varier le débit au Point A comme indiqué dans le tableau 10.

Tableau 10 : Simulation d'une variation du débit au Point A.

Temps (heures)	Débit Point A (m ³ /s)
0	88,5
480	60
720	88,5
960	100
1200	88,5
1440	fin de simulation

Les résultats de la simulation de l'hydrogramme du tableau 10 sont présentés dans la figure 21.

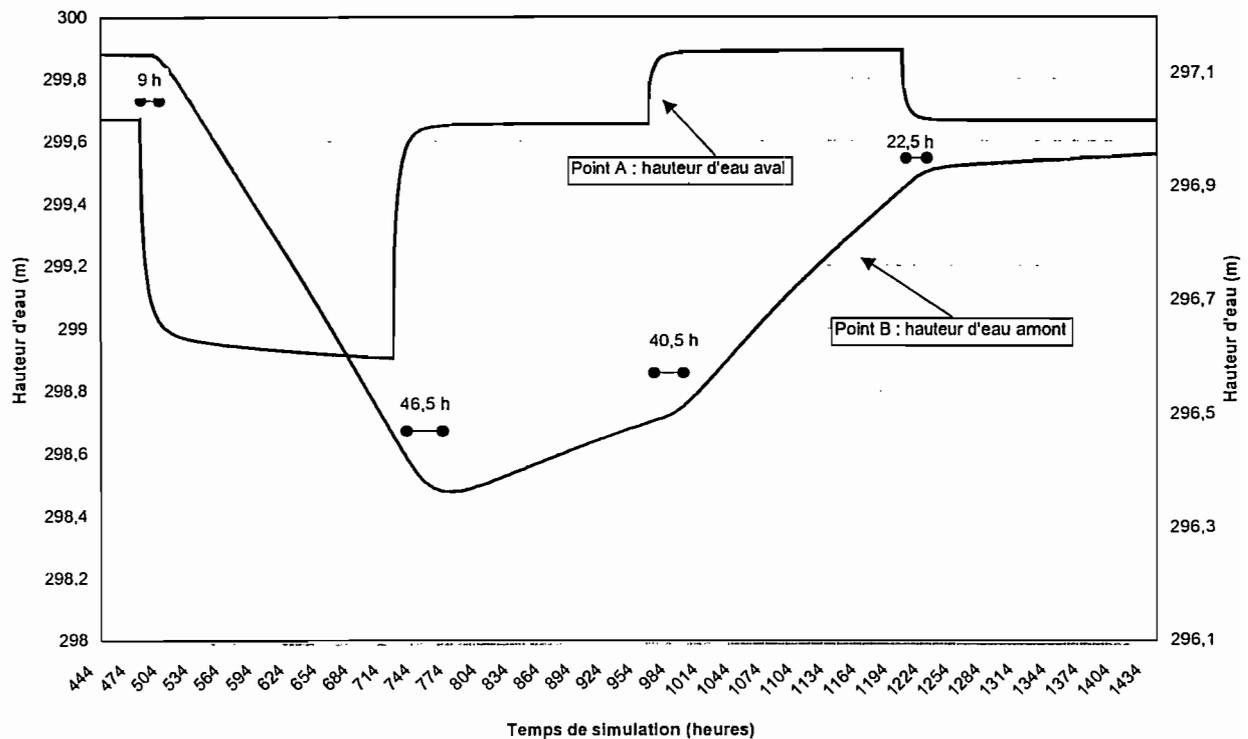


Fig. 21 : Simulation du temps de propagation des écoulements dans le système du Sahel entre Point A et Point B.

L'estimation du temps de réaction est donné en tableau 11.

Tableau 11 : Le temps de réponse (la différence entre le temps de l'impulse et le temps de réaction) des écoulements dans le système du Sahel entre Point A et Point B.

Variation débit Point A		Hauteur d'eau (t _r) Point B (m)	Temps de réponse (heures)
Débit avant impulse (m ³ /s)	Débit après impulse (m ³ /s)		
88,5	60	297,13	9
60	88,5	296,36	46,5
88,5	100	296,53	40,5
100	88,5	296,93	22,5

On constate que le temps de réponse ($t_r - t_i$) dépend d'une façon presque linéaire du volume d'eau dans le système entre les Point A et Point B et donc de la hauteur d'eau au Point B.

Par ailleurs, on remarque que les temps de réaction déterminés en chapitre 2.2 sont du même ordre que ceux calculés par le modèle.

2.6 Conclusions

La modélisation hydraulique nous a permis de répondre aux questions posées par le gestionnaire, à savoir :

- quelle est la capacité de stockage dans le Fala de Molodo pour parer l'éventualité d'une pénurie d'eau ?
- quel est le temps de réponse entre le moment d'une opération au Point A et la réaction au Point B ?

Il s'est avéré que la **capacité de stockage** dans le Fala de Molodo, entre les régulateurs du Point A et du Point B, est relativement faible. Elle est de l'ordre de 23,5 millions de m³ entre la cote maximale et minimale d'irrigation au Point B. Avec une demande de 50 m³/s de la part des zones de Niono, N'Débougou et Kouroumari, la réserve peut tenir seulement 5 jours. *La capacité de stockage est donc considérable pour une gestion de l'eau quotidienne, mais insuffisante pour combler une période de déficit, telle que s'est produite pendant l'étiage 1999.*

Il s'est avéré que le **temps de réponse**, entre le moment d'une opération au Point A et la réaction au Point B, est relativement court, entre une demi-journée quand le Fala est bien rempli (à la cote 297,13 m au Point B), et 2 jours quand le Fala de Molodo est moins rempli (en dessous de la cote 296,73 m).

La modélisation hydraulique semble donc être un bon outil pour répondre à des questions de gestion de l'eau à l'Office du Niger et l'utilisation du modèle a été jugée intéressante par les ingénieurs de l'Office du Niger, qui ont participé à la formation de modélisation hydraulique.

3. FORMATION D'UN INGENIEUR AUX TECHNIQUES DE JAUGEAGE ET A LA MODELISATION

3.1 Techniques de jaugeage

Au cours du mois de mars 2000, période des travaux de terrain, Mr Abdoulaye B. DIALLO, chef du service SERP de l'Office du Niger, a participé à des mesures de débit. Le jaugeage au moulinet consiste à mesurer les vitesses – en m/s – dans une section – en m² –, à travers laquelle on veut mesurer le débit – en m³/s –.

Le matériel utilisé pour un jaugeage est fonction de l'importance du cours d'eau (vitesse et profondeur). Nous avons utilisé un matériel embarqué ; un zodiac muni d'une potence, un 'saumon' de 25 kg à gouvernail auquel est fixé le moulinet. Au moulinet est fixée une hélice entraînée par le courant ; le nombre de tours de l'hélice est transmise à un compteur par un câble qui supporte le saumon (cable électro-porteur). Ce câble est enroulé sur un treuil équipé d'un cadran indiquant les profondeurs.

La section de la rive droite (RD) à la rive gauche (RG) est matérialisée par une corde graduée de mètre en mètre. L'ensemble des mesures se fait sur 15 verticales avec 6 points de mesure de vitesse par vertical. Un jaugeage demande la présence de 3 personnes :

- une pour le déplacement du bateau
- une seconde pour la manipulation du treuil
- la troisième manipulant le compteur de tours dirige le jaugeage indiquant les verticales, choisissant les profondeurs et notant les mesures .

Mr A.B. DIALLO a exercé chacun de ces postes

3.2 La modélisation hydraulique

M. FAMANTA de l'Office du Niger a participé à la collecte de données sur les sections en travers sur le Canal du Sahel le 9 mars 2000. La formation sur la modélisation hydraulique a eu lieu du 24 au 28 avril 2000 au centre de l'IRD à Bamako. Les ingénieurs suivants ont participé à cette formation :

- M. Mamady FAMANTA, SAH
- M. Abdoulaye Bana DIALLO, SERP

Pendant la formation, nous avons abordé les sujets suivants :

- Principes hydrauliques et applications
- Principes de la modélisation hydrauliques
- Modélisation du premier bief du Fala de Molodo (travaux pratiques) :
 - construction d'un modèle
 - calage et vérification d'un modèle
 - développement, application et évaluation des scénarios

Le programme détaillé est présenté dans l'annexe 6. Les résultats présentés dans les chapitres 2.4 et 2.5 sont en partie issus de cette formation.

REFERENCES

Carlier M. , Hydraulique générale et appliquée, Eyrolles éd. 1972.

Jaccon G. , Manuel d'hydrométrie tome 5 : tracé de la courbe de tarage et calcul des débits, ORSTOM 1986.

Kcita N., K. Kaloga, J. F. Bélières. 1999. D'une gestion étatique de l'eau à une gestion paritaire état/usagers : Le cas de L'Office du Niger au Mali. HYDROTOP 99, Marseille du 15 au 17 juin 1999.

Morell M. et Grandin J. , Office du Niger - Etalonnage ouvrage point A - Canal du Sahel, ORSTOM Bamako 1981.

ANNEXE 1 : LISTE DES JAUGEAGES REALISES EN 2000 AU POINT A

A1.1 Liste des jaugeages réalisés sur le canal du Sahel

Date	Vannes ouvertes	Ouverture e en cm	Dénivelée D en cm	Débit Q en m ³ /s	Auteur(s)
2/3/2000	0	0	345,5	1,75 ¹	Dicko
3/3/2000	5	10	297	18,2	Mahieux
4/3/2000	5	20	247,5	33,1	Mahieux
5/3/2000	5	50	170,5	57,6	Dicko
5/3/2000	5	80	133,5	77,0	Dicko
6/3/2000	5	100	95,5	82,6	Mahieux
14/3/2000	5	120	98,5	107	Gréard, Hassane, Diallo
14/3/2000	1	175	170	46,3	Dicko
15/3/2000	1	250	178	62,2	Dicko

A1.2. Liste des jaugeages réalisés sur le canal du Macina

Date	Vannes ouvertes	Ouverture e en cm	Dénivelée D en cm	Débit Q en m ³ /s	Auteur(s)
2/3/2000	1	8	228,5	2,83	Mahieux
3/3/2000	5	10	199	16,6	Dicko
4/3/2000	5	20	164	26,3	Dicko
6/3/2000	5	50	91	46,5	Dicko
7/3/2000	5	80	60,5	54,6	Dicko
7/3/2000	5	100	55,5	60,6	Mahieux
22/3/2000	5	120	51	70,7	Gréard, Dicko
22/3/2000	1	175	113,5	31,1	Dicko
23/3/2000	1	250	94,5	45,8	Gréard, Dicko

¹ Débit de fuite

A1.3 Liste des jaugeages réalisés sur le canal Costes

Date	Vannes ouvertes	Ouverture e en cm	Dénivelée D en cm	Débit Q en m ³ /s	Auteur(s)
2/3/2000	0	0	108	0,605 ²	Dicko
3/3/2000	2	12	55,5	2,80	Mahieux
4/3/2000	2	24	26	4,79	Mahieux, Diallo
5/3/2000	2	48	8	5,85	Dicko
5/3/2000	2	78	3,5	6,57	Dicko
15/3/2000	2	78	1	5,93	Gréard, Dicko
15/3/2000	2	102	1	6,34	Dicko

A1.4 Liste des jaugeages réalisés sur le régulateur du Point B

Date	Vannes ouvertes	Ouverture e en cm	Dénivelée D en cm	Débit Q en m ³ /s	Auteur(s)
29/3/2000	2	Fermé	140	0,1	Mahieux, Dicko
29/3/2000	2	16 (4 dents)	139	6,78	Mahieux, Dicko
30/3/2000	2	32 (8 dents)	126	12,8	Mahieux, Dicko
6/4/2000	2	48 (12 dents)	111	17,8	Gréard, Mahieux, Dicko
6/4/2000	2	64 (16 dents)	101	21,24	Gréard, Mahieux, Dicko
7/4/2000	2	80 (20 dents)	87	27,6	Gréard, Mahieux, Dicko
7/4/2000	2	96 (24 dents)	78	30,17	Gréard, Mahieux, Dicko
8/4/2000	2	120 (30 dents)	63	34,22	Gréard, Mahieux, Dicko

Les résultats détaillés des jaugeages sont présentés dans le tome 2 (Mahieux et al., 2000).

² Débit surestimé (débit réel voisin de 100 l/s)

ANNEXE 2 : ABAQUES ETABLIS

Ouverture en m	CANAL DU SAHEL : DEBIT PAR PERTUIS																		
	Perte de charge sur l'ouvrage en m ($H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}$)																		
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,25	2,5
0,1	0,245	0,385	0,501	0,604	0,786	0,948	1,10	1,23	1,36	1,49	1,61	1,72	1,94	2,14	2,33	2,52	2,70	2,91	3,12
0,2	0,491	0,770	1,00	1,21	1,57	1,90	2,19	2,47	2,73	2,98	3,21	3,44	3,87	4,28	4,67	5,04	5,40	5,83	6,24
0,3	0,736	1,16	1,50	1,81	2,36	2,84	3,29	3,70	4,09	4,46	4,82	5,16	5,81	6,42	7,00	7,56	8,10	8,74	9,36
0,4	0,982	1,54	2,00	2,42	3,15	3,79	4,38	4,94	5,46	5,95	6,42	6,88	7,75	8,56	9,34	10,1	10,8	11,7	12,5
0,5	1,23	1,93	2,51	3,02	3,93	4,74	5,48	6,17	6,82	7,44	8,03	8,6	9,68	10,7	11,7	12,6	13,5	14,6	15,6
0,6	1,47	2,31	3,01	3,63	4,72	5,69	6,58	7,40	8,18	8,93	9,6	10,3	11,6	12,8	14,0	15,1	16,2	17,5	18,7
0,7	1,72	2,70	3,51	4,23	5,50	6,64	7,67	8,64	9,55	10,4	11,2	12,0	13,6	15,0	16,3	17,6	18,9	20,4	21,8
0,8	1,96	3,08	4,01	4,83	6,29	7,59	8,77	9,87	10,9	11,9	12,8	13,8	15,5	17,1	18,7	20,2	21,6	23,3	25,0
0,9	2,21	3,47	4,51	5,44	7,08	8,53	9,87	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	17,4	19,3	21,0	22,7	24,3	26,2	28,1
1	2,45	3,85	5,01	6,04	7,86	9,48	11,0	12,3	13,6	14,9	16,1	17,2	19,4	21,4	23,3	25,2	27,0	29,1	31,2
1,1	2,70	4,24	5,51	6,65	8,65	10,4	12,1	13,6	15,0	16,4	17,7	18,9	21,3	23,5	25,7	27,7	29,7	32,1	34,3
1,2	2,94	4,62	6,01	7,25	9,44	11,4	13,2	14,8	16,4	17,9	19,3	20,6	23,2	25,7	28,0	30,2	32,4	35,0	37,4
1,3	3,19	5,01	6,52	7,85	10,2	12,3	14,2	16,0	17,7	19,3	20,9	22,4	25,2	27,8	30,3	32,8	35,1	37,9	40,6
1,4	3,44	5,39	7,02	8,46	11,0	13,3	15,3	17,3	19,1	20,8	22,5	24,1	27,1	30,0	32,7	35,3	37,8	40,8	43,7
1,5	3,68	5,78	7,52	9,06	11,8	14,2	16,4	18,5	20,5	22,3	24,1	25,8	29,0	32,1	35,0	37,8	40,5	43,7	46,8
1,6	3,93	6,16	8,02	9,67	12,6	15,2	17,5	19,7	21,8	23,8	25,7	27,5	31,0	34,2	37,4	40,3	43,2	46,6	49,9
1,7	4,17	6,55	8,52	10,3	13,4	16,1	18,6	21,0	23,2	25,3	27,3	29,2	32,9	36,4	39,7	42,8	45,9	49,5	53,0
1,8	4,42	6,93	9,02	10,9	14,2	17,1	19,7	22,2	24,6	26,8	28,9	31,0	34,9	38,5	42,0	45,4	48,6	52,4	56,2
1,9	4,66	7,32	9,52	11,5	14,9	18,0	20,8	23,4	25,9	28,3	30,5	32,7	36,8	40,7	44,4	47,9	51,3	55,4	59,3
2	4,91	7,70	10,0	12,1	15,7	19,0	21,9	24,7	27,3	29,8	32,1	34,4	38,7	42,8	46,7	50,4	54,0	58,3	62,4
2,1	5,15	8,09	10,5	12,7	16,5	19,9	23,0	25,9	28,6	31,2	33,7	36,1	40,7	45,0	49,0	52,9	56,7	61,2	65,5
2,2	5,40	8,47	11,0	13,3	17,3	20,9	24,1	27,1	30,0	32,7	35,3	37,8	42,6	47,1	51,4	55,4	59,4	64,1	68,6
2,3	5,64	8,86	11,5	13,9	18,1	21,8	25,2	28,4	31,4	34,2	36,9	39,6	44,5	49,2	53,7	58,0	62,1	67,0	71,8
2,4	5,89	9,24	12,0	14,5	18,9	22,8	26,3	29,6	32,7	35,7	38,5	41,3	46,5	51,4	56,0	60,5	64,8	69,9	74,9
2,5	6,13	9,63	12,5	15,1	19,7	23,7	27,4	30,9	34,1	37,2	40,2	43,0	48,4	53,5	58,4	63,0	67,5	72,8	78,0
3	7,36	11,6	15,0	18,1	23,6	28,4	32,9	37,0	40,9	44,6	48,2	51,6	58,1	64,2	70,0	75,6	81,0	87,4	93,6
3,5	8,59	13,5	17,5	21,1	27,5	33,2	38,4	43,2	47,7	52,1	56,2	60,2	67,8	74,9	81,7	88,2	94,5	102	109
4	9,82	15,4	20,0	24,2	31,5	37,9	43,8	49,4	54,6	59,5	64,2	68,8	77,5	85,6	93,4	101	108	117	125

Source : IRD, 2000

Ouverture en m	CANAL DU MACINA : DEBIT PAR PERTUIS																		
	Perte de charge sur l'ouvrage en m ($H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}$)																		
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,25	2,5
0,1	0,250	0,401	0,528	0,643	0,847	1,03	1,20	1,36	1,51	1,65	1,79	1,92	2,17	2,41	2,64	2,86	3,08	3,33	3,58
0,2	0,501	0,802	1,06	1,29	1,69	2,06	2,40	2,71	3,01	3,30	3,57	3,84	4,35	4,83	5,29	5,73	6,15	6,67	7,16
0,3	0,751	1,203	1,59	1,93	2,54	3,09	3,60	4,07	4,52	4,95	5,36	5,76	6,52	7,24	7,93	8,59	9,23	10,0	10,7
0,4	1,00	1,60	2,11	2,57	3,39	4,12	4,79	5,43	6,03	6,60	7,15	7,68	8,69	9,65	10,6	11,5	12,3	13,3	14,3
0,5	1,25	2,01	2,64	3,21	4,23	5,15	5,99	6,78	7,53	8,25	8,94	9,60	10,9	12,1	13,2	14,3	15,4	16,7	17,9
0,6	1,50	2,41	3,17	3,86	5,08	6,18	7,19	8,14	9,04	9,90	10,7	11,5	13,0	14,5	15,9	17,2	18,5	20,0	21,5
0,7	1,75	2,81	3,70	4,50	5,93	7,21	8,39	9,50	10,5	11,5	12,5	13,4	15,2	16,9	18,5	20,0	21,5	23,3	25,1
0,8	2,00	3,21	4,23	5,14	6,77	8,24	9,59	10,9	12,1	13,2	14,3	15,4	17,4	19,3	21,1	22,9	24,6	26,7	28,6
0,9	2,25	3,61	4,76	5,78	7,62	9,27	10,8	12,2	13,6	14,8	16,1	17,3	19,6	21,7	23,8	25,8	27,7	30,0	32,2
1,0	2,50	4,01	5,28	6,43	8,47	10,3	12,0	13,6	15,1	16,5	17,9	19,2	21,7	24,1	26,4	28,6	30,8	33,3	35,8
1,1	2,75	4,41	5,81	7,07	9,31	11,3	13,2	14,9	16,6	18,1	19,7	21,1	23,9	26,5	29,1	31,5	33,8	36,7	39,4
1,2	3,00	4,81	6,34	7,71	10,2	12,4	14,4	16,3	18,1	19,8	21,4	23,0	26,1	29,0	31,7	34,4	36,9	40,0	43,0
1,3	3,25	5,21	6,87	8,35	11,0	13,4	15,6	17,6	19,6	21,4	23,2	25,0	28,3	31,4	34,4	37,2	40,0	43,3	46,5
1,4	3,51	5,62	7,40	9,00	11,9	14,4	16,8	19,0	21,1	23,1	25,0	26,9	30,4	33,8	37,0	40,1	43,1	46,7	50,1
1,5	3,76	6,02	7,93	9,64	12,7	15,4	18,0	20,3	22,6	24,7	26,8	28,8	32,6	36,2	39,6	43,0	46,1	50,0	53,7
1,6	4,01	6,42	8,46	10,3	13,5	16,5	19,2	21,7	24,1	26,4	28,6	30,7	34,8	38,6	42,3	45,8	49,2	53,3	57,3
1,7	4,26	6,82	8,98	10,9	14,4	17,5	20,4	23,1	25,6	28,0	30,4	32,6	36,9	41,0	44,9	48,7	52,3	56,7	60,9
1,8	4,51	7,22	9,51	11,6	15,2	18,5	21,6	24,4	27,1	29,7	32,2	34,6	39,1	43,4	47,6	51,5	55,4	60,0	64,4
1,9	4,76	7,62	10,0	12,2	16,1	19,6	22,8	25,8	28,6	31,3	34,0	36,5	41,3	45,9	50,2	54,4	58,4	63,3	68,0
2	5,01	8,02	10,6	12,9	16,9	20,6	24,0	27,1	30,1	33,0	35,7	38,4	43,5	48,3	52,9	57,3	61,5	66,7	71,6
2,1	5,26	8,42	11,1	13,5	17,8	21,6	25,2	28,5	31,6	34,6	37,5	40,3	45,6	50,7	55,5	60,1	64,6	70,0	75,2
2,2	5,51	8,83	11,6	14,1	18,6	22,7	26,4	29,8	33,1	36,3	39,3	42,2	47,8	53,1	58,1	63,0	67,7	73,3	78,8
2,3	5,76	9,23	12,2	14,8	19,5	23,7	27,6	31,2	34,6	37,9	41,1	44,2	50,0	55,5	60,8	65,9	70,8	76,7	82,3
2,4	6,01	9,63	12,7	15,4	20,3	24,7	28,8	32,6	36,2	39,6	42,9	46,1	52,2	57,9	63,4	68,7	73,8	80,0	85,9
2,5	6,26	10,0	13,2	16,1	21,2	25,7	30,0	33,9	37,7	41,2	44,7	48,0	54,3	60,3	66,1	71,6	76,9	83,3	89,5
3	7,51	12,0	15,9	19,3	25,4	30,9	36,0	40,7	45,2	49,5	53,6	57,6	65,2	72,4	79,3	85,9	92,3	100	107
3,5	8,76	14,0	18,5	22,5	29,6	36,0	41,9	47,5	52,7	57,7	62,6	67,2	76,1	84,5	92,5	100	108	117	125
4	10,0	16,0	21,1	25,7	33,9	41,2	47,9	54,3	60,3	66,0	71,5	76,8	86,9	96,5	106	115	123	133	143

Source : IRD, 2000

Ouverture en m	CANAL COSTES ONGOIBA : DEBIT PAR PERTUIS															
	Perte de charge sur l'ouvrage en m ($H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}$)															
	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,06	0,197	0,325	0,403	0,457	0,499	0,535	0,566	0,594	0,619	0,642	0,663	0,702	0,736	0,767	0,796	0,822
0,12	0,394	0,650	0,805	0,913	0,998	1,07	1,13	1,19	1,24	1,28	1,33	1,40	1,47	1,53	1,59	1,64
0,18	0,592	0,974	1,21	1,37	1,50	1,60	1,70	1,78	1,86	1,93	1,99	2,10	2,21	2,30	2,39	2,47
0,24	0,789	1,30	1,61	1,83	2,00	2,14	2,26	2,37	2,47	2,57	2,65	2,81	2,94	3,07	3,18	3,29
0,3	0,986	1,62	2,01	2,28	2,50	2,67	2,83	2,97	3,09	3,21	3,32	3,51	3,68	3,84	3,98	4,11
0,36	1,18	1,95	2,42	2,74	2,99	3,21	3,40	3,56	3,71	3,85	3,98	4,21	4,42	4,60	4,77	4,93
0,42	1,38	2,27	2,82	3,20	3,49	3,74	3,96	4,16	4,33	4,49	4,64	4,91	5,15	5,37	5,57	5,75
0,48	1,58	2,60	3,22	3,65	3,99	4,28	4,53	4,75	4,95	5,13	5,30	5,61	5,89	6,14	6,36	6,58
0,54	1,77	2,92	3,62	4,11	4,49	4,81	5,09	5,34	5,57	5,78	5,97	6,31	6,62	6,90	7,16	7,40
0,6	1,97	3,25	4,03	4,57	4,99	5,35	5,66	5,94	6,19	6,42	6,63	7,02	7,36	7,67	7,96	8,22
0,66	2,17	3,57	4,43	5,02	5,49	5,88	6,23	6,53	6,81	7,06	7,29	7,72	8,10	8,44	8,75	9,04
0,72	2,37	3,90	4,83	5,48	5,99	6,42	6,79	7,12	7,42	7,70	7,96	8,42	8,83	9,20	9,55	9,86
0,78	2,56	4,22	5,23	5,93	6,49	6,95	7,36	7,72	8,04	8,34	8,62	9,12	9,57	9,97	10,3	10,7
0,84	2,76	4,55	5,64	6,39	6,99	7,49	7,92	8,31	8,66	8,98	9,28	9,82	10,3	10,7	11,1	11,5
0,9	2,96	4,87	6,04	6,85	7,49	8,02	8,49	8,90	9,28	9,63	9,95	10,5	11,0	11,5	11,9	12,3
0,96	3,15	5,20	6,44	7,30	7,99	8,56	9,06	9,50	9,90	10,3	10,6	11,2	11,8	12,3	12,7	13,2
1,02	3,35	5,52	6,84	7,76	8,48	9,09	9,62	10,1	10,5	10,9	11,3	11,9	12,5	13,0	13,5	14,0
1,08	3,55	5,85	7,25	8,22	8,98	9,63	10,2	10,7	11,1	11,6	11,9	12,6	13,2	13,8	14,3	14,8
1,14	3,75	6,17	7,65	8,67	9,48	10,2	10,8	11,3	11,8	12,2	12,6	13,3	14,0	14,6	15,1	15,6
1,2	3,94	6,50	8,05	9,13	9,98	10,7	11,3	11,9	12,4	12,8	13,3	14,0	14,7	15,3	15,9	16,4

Source : IRD, 2000

Ouverture nb dents (*)	CANAL COSTES ONGOIBA : DEBIT PAR PERTUIS																		
	Perte de charge sur l'ouvrage en m ($H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}$)																		
	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
1	0,197	0,325	0,403	0,457	0,499	0,535	0,566	0,619	0,663	0,702	0,736	0,767	0,796	0,822	0,87	0,912	0,951	0,986	1,02
2	0,394	0,650	0,805	0,913	0,998	1,07	1,13	1,24	1,33	1,40	1,47	1,53	1,59	1,64	1,74	1,82	1,90	1,97	2,04
4	0,789	1,299	1,61	1,83	2,00	2,14	2,26	2,47	2,65	2,81	2,94	3,07	3,18	3,29	3,48	3,65	3,80	3,95	4,08
6	1,183	1,95	2,42	2,74	2,99	3,21	3,40	3,71	3,98	4,21	4,42	4,60	4,77	4,93	5,22	5,47	5,71	5,92	6,11
8	1,577	2,60	3,22	3,65	3,99	4,28	4,53	4,95	5,30	5,61	5,89	6,14	6,36	6,58	6,96	7,30	7,61	7,89	8,15
10	1,97	3,25	4,03	4,57	4,99	5,35	5,66	6,19	6,63	7,02	7,36	7,67	7,96	8,22	8,70	9,12	9,51	9,86	10,2
12	2,37	3,90	4,83	5,48	5,99	6,42	6,79	7,42	7,96	8,42	8,83	9,20	9,55	9,86	10,4	10,9	11,4	11,8	12,2
14	2,76	4,55	5,64	6,39	6,99	7,49	7,92	8,66	9,28	9,82	10,3	10,7	11,1	11,5	12,2	12,8	13,3	13,8	14,3
16	3,15	5,20	6,44	7,30	7,99	8,56	9,06	9,90	10,6	11,2	11,8	12,3	12,7	13,2	13,9	14,6	15,2	15,8	16,3
18	3,55	5,85	7,25	8,22	8,98	9,63	10,2	11,1	11,9	12,6	13,2	13,8	14,3	14,8	15,7	16,4	17,1	17,8	18,3
20	3,94	6,50	8,05	9,13	9,98	10,7	11,3	12,4	13,3	14,0	14,7	15,3	15,9	16,4	17,4	18,2	19,0	19,7	20,4
22	4,34	7,14	8,86	10,0	11,0	11,8	12,5	13,6	14,6	15,4	16,2	16,9	17,5	18,1	19,1	20,1	20,9	21,7	22,4
24	4,73	7,79	9,66	11,0	12,0	12,8	13,6	14,8	15,9	16,8	17,7	18,4	19,1	19,7	20,9	21,9	22,8	23,7	24,5
26	5,13	8,44	10,5	11,9	13,0	13,9	14,7	16,1	17,2	18,2	19,1	19,9	20,7	21,4	22,6	23,7	24,7	25,6	26,5
28	5,52	9,09	11,3	12,8	14,0	15,0	15,8	17,3	18,6	19,6	20,6	21,5	22,3	23,0	24,4	25,5	26,6	27,6	28,5
30	5,92	9,74	12,1	13,7	15,0	16,0	17,0	18,6	19,9	21,0	22,1	23,0	23,9	24,7	26,1	27,4	28,5	29,6	30,6
32	6,31	10,4	12,9	14,6	16,0	17,1	18,1	19,8	21,2	22,5	23,6	24,5	25,5	26,3	27,8	29,2	30,4	31,6	32,6
34	6,70	11,0	13,7	15,5	17,0	18,2	19,2	21,0	22,5	23,9	25,0	26,1	27,0	27,9	29,6	31,0	32,3	33,5	34,6
36	7,10	11,7	14,5	16,4	18,0	19,3	20,4	22,3	23,9	25,3	26,5	27,6	28,6	29,6	31,3	32,8	34,2	35,5	36,7
38	7,49	12,3	15,3	17,3	19,0	20,3	21,5	23,5	25,2	26,7	28,0	29,1	30,2	31,2	33,1	34,7	36,1	37,5	38,7
40	7,89	13,0	16,1	18,3	20,0	21,4	22,6	24,7	26,5	28,1	29,4	30,7	31,8	32,9	34,8	36,5	38,0	39,5	40,8

(*) Une dent correspond à 6 cm

Ouverture en m	REGULATEUR DU POINT B (FALA DE MOLODO) : DEBIT PAR PERTUIS																		
	Perte de charge sur l'ouvrage en m ($H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}$)																		
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,25	2,5
0,08	0,326	0,458	0,559	0,644	0,785	0,904	1,01	1,10	1,19	1,27	1,34	1,42	1,55	1,67	1,78	1,89	1,99	2,11	2,22
0,16	0,653	0,916	1,12	1,29	1,57	1,81	2,02	2,20	2,38	2,54	2,69	2,83	3,10	3,34	3,57	3,78	3,98	4,21	4,44
0,24	0,979	1,37	1,68	1,93	2,35	2,71	3,02	3,31	3,57	3,81	4,03	4,25	4,64	5,01	5,35	5,67	5,97	6,32	6,66
0,32	1,31	1,83	2,24	2,57	3,14	3,62	4,03	4,41	4,76	5,08	5,38	5,66	6,19	6,68	7,13	7,55	7,95	8,43	8,87
0,4	1,63	2,29	2,79	3,22	3,92	4,52	5,04	5,51	5,94	6,35	6,72	7,08	7,74	8,35	8,91	9,44	9,94	10,5	11,1
0,48	1,96	2,75	3,35	3,86	4,71	5,42	6,05	6,61	7,13	7,62	8,07	8,50	9,29	10,0	10,7	11,3	11,9	12,6	13,3
0,56	2,28	3,21	3,91	4,50	5,49	6,33	7,06	7,72	8,32	8,89	9,41	9,91	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,7	15,5
0,64	2,61	3,67	4,47	5,15	6,28	7,23	8,07	8,82	9,51	10,2	10,8	11,3	12,4	13,4	14,3	15,1	15,9	16,9	17,7
0,72	2,94	4,12	5,03	5,79	7,06	8,13	9,07	9,92	10,7	11,4	12,1	12,7	13,9	15,0	16,0	17,0	17,9	19,0	20,0
0,8	3,26	4,58	5,59	6,44	7,85	9,04	10,1	11,0	11,9	12,7	13,4	14,2	15,5	16,7	17,8	18,9	19,9	21,1	22,2
0,88	3,59	5,04	6,15	7,08	8,63	9,94	11,1	12,1	13,1	14,0	14,8	15,6	17,0	18,4	19,6	20,8	21,9	23,2	24,4
0,96	3,92	5,50	6,71	7,72	9,42	10,8	12,1	13,2	14,3	15,2	16,1	17,0	18,6	20,0	21,4	22,7	23,9	25,3	26,6
1,04	4,24	5,96	7,27	8,37	10,2	11,7	13,1	14,3	15,5	16,5	17,5	18,4	20,1	21,7	23,2	24,6	25,9	27,4	28,8
1,12	4,57	6,41	7,82	9,01	11,0	12,7	14,1	15,4	16,6	17,8	18,8	19,8	21,7	23,4	25,0	26,4	27,8	29,5	31,1
1,2	4,89	6,87	8,38	9,65	11,8	13,6	15,1	16,5	17,8	19,0	20,2	21,2	23,2	25,0	26,7	28,3	29,8	31,6	33,3
1,28	5,22	7,33	8,94	10,3	12,6	14,5	16,1	17,6	19,0	20,3	21,5	22,7	24,8	26,7	28,5	30,2	31,8	33,7	35,5
1,36	5,55	7,79	9,50	10,9	13,3	15,4	17,1	18,7	20,2	21,6	22,9	24,1	26,3	28,4	30,3	32,1	33,8	35,8	37,7
1,44	5,87	8,25	10,1	11,6	14,1	16,3	18,1	19,8	21,4	22,8	24,2	25,5	27,9	30,1	32,1	34,0	35,8	37,9	39,9
1,52	6,20	8,71	10,6	12,2	14,9	17,2	19,2	20,9	22,6	24,1	25,6	26,9	29,4	31,7	33,9	35,9	37,8	40,0	42,2
1,6	6,53	9,16	11,2	12,9	15,7	18,1	20,2	22,0	23,8	25,4	26,9	28,3	31,0	33,4	35,7	37,8	39,8	42,1	44,4
1,68	6,85	9,62	11,7	13,5	16,5	19,0	21,2	23,2	25,0	26,7	28,2	29,7	32,5	35,1	37,4	39,7	41,8	44,2	46,6
1,76	7,18	10,1	12,3	14,2	17,3	19,9	22,2	24,3	26,2	27,9	29,6	31,2	34,1	36,7	39,2	41,5	43,8	46,4	48,8
1,84	7,50	10,5	12,9	14,8	18,1	20,8	23,2	25,4	27,3	29,2	30,9	32,6	35,6	38,4	41,0	43,4	45,7	48,5	51,0
1,92	7,83	11,0	13,4	15,4	18,8	21,7	24,2	26,5	28,5	30,5	32,3	34,0	37,2	40,1	42,8	45,3	47,7	50,6	53,2
2	8,16	11,5	14,0	16,1	19,6	22,6	25,2	27,6	29,7	31,7	33,6	35,4	38,7	41,7	44,6	47,2	49,7	52,7	55,5

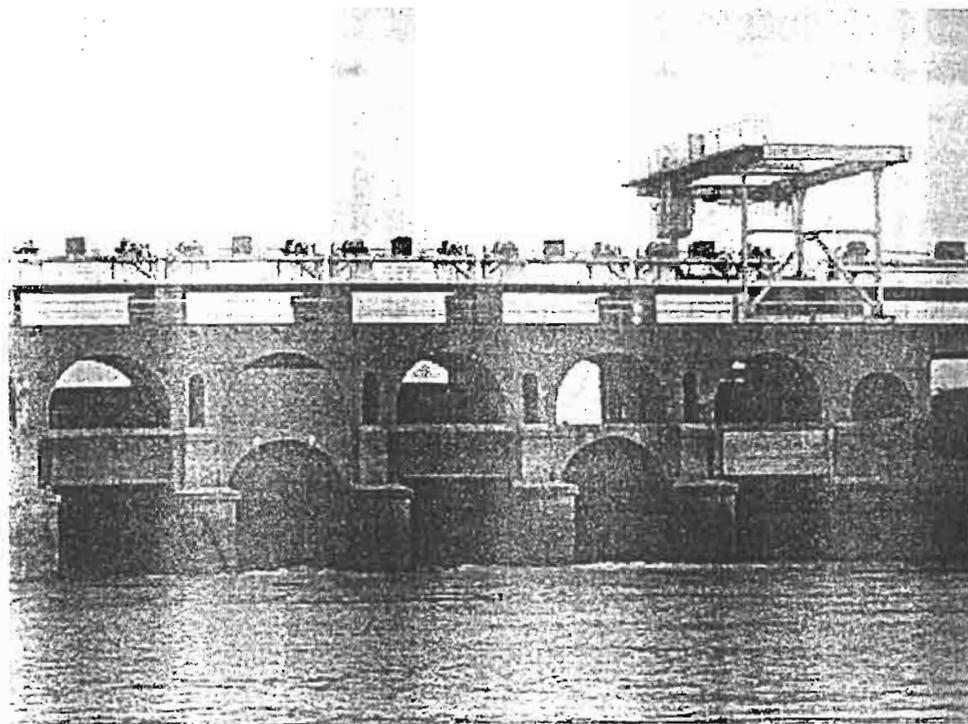
Source : IRD, 2000

Ouverture nb dents (*)	REGULATEUR DU POINT B (FALA DE MOLODO) : DEBIT PAR PERTUIS																		
	Perte de charge sur l'ouvrage en m ($H_{\text{amont}} - H_{\text{aval}}$)																		
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,25	2,5
2	0,326	0,458	0,559	0,644	0,785	0,904	1,01	1,10	1,19	1,27	1,34	1,42	1,55	1,67	1,78	1,89	1,99	2,11	2,22
4	0,653	0,916	1,12	1,29	1,57	1,81	2,02	2,20	2,38	2,54	2,69	2,83	3,10	3,34	3,57	3,78	3,98	4,21	4,44
6	0,979	1,37	1,68	1,93	2,35	2,71	3,02	3,31	3,57	3,81	4,03	4,25	4,64	5,01	5,35	5,67	5,97	6,32	6,66
8	1,31	1,83	2,24	2,57	3,14	3,62	4,03	4,41	4,76	5,08	5,38	5,66	6,19	6,68	7,13	7,55	7,95	8,43	8,87
10	1,63	2,29	2,79	3,22	3,92	4,52	5,04	5,51	5,94	6,35	6,72	7,08	7,74	8,35	8,91	9,44	9,94	10,5	11,1
12	1,96	2,75	3,35	3,86	4,71	5,42	6,05	6,61	7,13	7,62	8,07	8,50	9,29	10,0	10,7	11,3	11,9	12,6	13,3
14	2,28	3,21	3,91	4,50	5,49	6,33	7,06	7,72	8,32	8,89	9,41	9,91	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,7	15,5
16	2,61	3,67	4,47	5,15	6,28	7,23	8,07	8,82	9,51	10,2	10,8	11,3	12,4	13,4	14,3	15,1	15,9	16,9	17,7
18	2,94	4,12	5,03	5,79	7,06	8,13	9,07	9,92	10,7	11,4	12,1	12,7	13,9	15,0	16,0	17,0	17,9	19,0	20,0
20	3,26	4,58	5,59	6,44	7,85	9,04	10,1	11,0	11,9	12,7	13,4	14,2	15,5	16,7	17,8	18,9	19,9	21,1	22,2
25	4,08	5,73	6,99	8,04	9,81	11,3	12,6	13,8	14,9	15,9	16,8	17,7	19,4	20,9	22,3	23,6	24,9	26,3	27,7
30	4,89	6,87	8,38	9,65	11,8	13,6	15,1	16,5	17,8	19,0	20,2	21,2	23,2	25,0	26,7	28,3	29,8	31,6	33,3
35	5,71	8,02	9,78	11,3	13,7	15,8	17,6	19,3	20,8	22,2	23,5	24,8	27,1	29,2	31,2	33,1	34,8	36,9	38,8
40	6,53	9,16	11,2	12,9	15,7	18,1	20,2	22,0	23,8	25,4	26,9	28,3	31,0	33,4	35,7	37,8	39,8	42,1	44,4
45	7,34	10,3	12,6	14,5	17,7	20,3	22,7	24,8	26,8	28,6	30,3	31,9	34,8	37,6	40,1	42,5	44,7	47,4	49,9
50	8,16	11,5	14,0	16,1	19,6	22,6	25,2	27,6	29,7	31,7	33,6	35,4	38,7	41,7	44,6	47,2	49,7	52,7	55,5
55	8,97	12,6	15,4	17,7	21,6	24,9	27,7	30,3	32,7	34,9	37,0	38,9	42,6	45,9	49,0	51,9	54,7	57,9	61,0
60	9,79	13,7	16,8	19,3	23,5	27,1	30,2	33,1	35,7	38,1	40,3	42,5	46,4	50,1	53,5	56,7	59,7	63,2	66,6
65	10,6	14,9	18,2	20,9	25,5	29,4	32,8	35,8	38,6	41,3	43,7	46,0	50,3	54,3	57,9	61,4	64,6	68,5	72,1
70	11,4	16,0	19,6	22,5	27,5	31,6	35,3	38,6	41,6	44,4	47,1	49,6	54,2	58,4	62,4	66,1	69,6	73,7	77,6
75	12,2	17,2	21,0	24,1	29,4	33,9	37,8	41,3	44,6	47,6	50,4	53,1	58,1	62,6	66,9	70,8	74,6	79,0	83,2
80	13,1	18,3	22,4	25,7	31,4	36,2	40,3	44,1	47,6	50,8	53,8	56,6	61,9	66,8	71,3	75,5	79,5	84,3	88,7
85	13,9	19,5	23,8	27,3	33,4	38,4	42,8	46,9	50,5	53,9	57,2	60,2	65,8	71,0	75,8	80,3	84,5	89,5	94,3
90	14,7	20,6	25,2	29,0	35,3	40,7	45,4	49,6	53,5	57,1	60,5	63,7	69,7	75,1	80,2	85,0	89,5	94,8	99,8

(*) une dent correspond à 4 cm

Annexe 3. Photo album

3.1 Réactualisation des abaques des ouvrages de régulation aux Points A et B



Vue de l'ouvrage de régulation du système du Sahel au Point A (aval). Les cinq vannes sont ouvertes de 10 cm.
Photo : A. Mameux, mars 2000



Le jaugeage sur le Canal Costes Ongoïba se termine. Equipe conjointe de l'IRD-Office du Niger.
Photo A. Mameux, mars 2000



Deux nouveaux éléments d'échelle (8-9, 9-10) ont été installés en aval de l'ouvrage de régulation du Canal du Macina pour faciliter la lecture de la cote aval. L'ancienne échelle de fonte, dite de Markala, est difficile à lire et est soumise à d'importants remous.

Photo : A. Mahieux, mars 2000



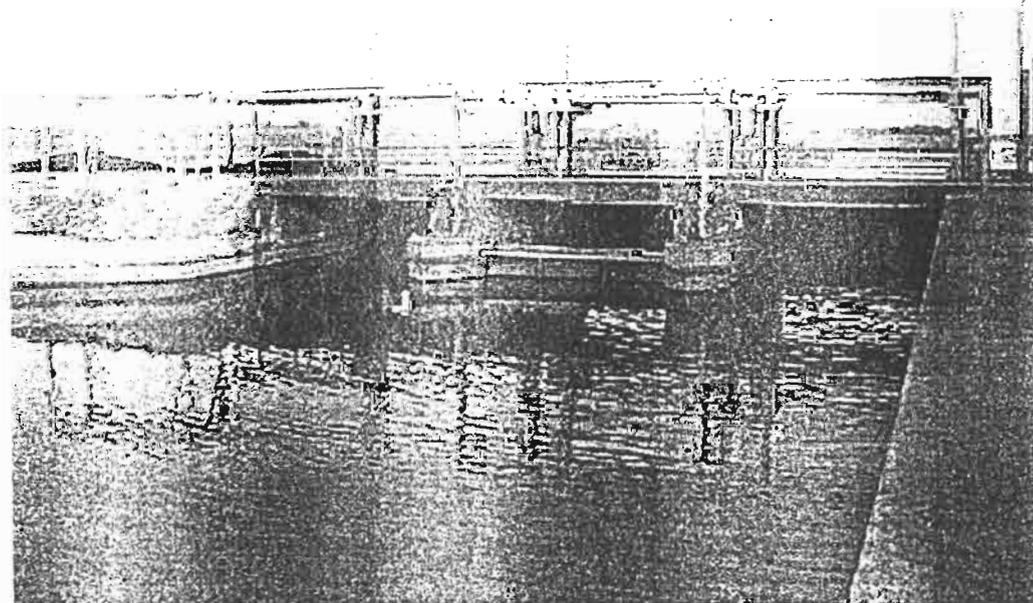
L'échelle en aval de l'ouvrage du Canal du Sahel est réhabilitée pour permettre la lecture de la cote aval.

Photo : A. Mahieux, mars 2000



Les ouvertures des vannes sont mesurées pour établir la courbe de tarage pour l'ouvrage de régulation du Canal du Sahel au Point A.

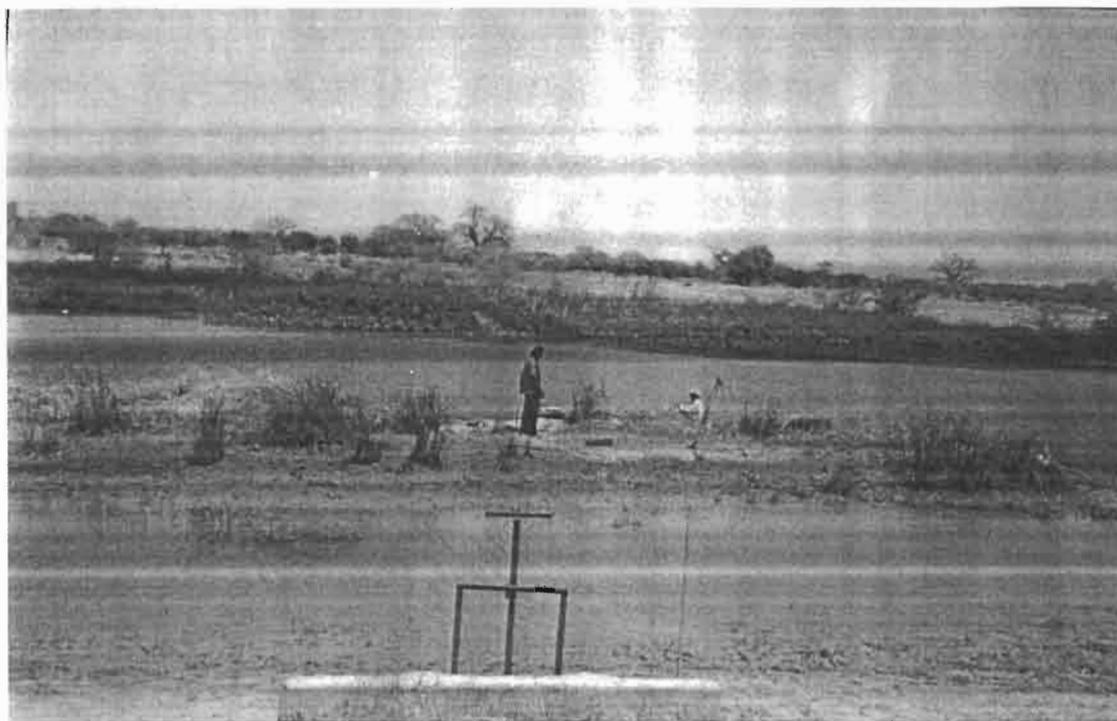
Photo : A. Mahieux, mars 2000



En aval du régulateur du Point B sur le Fala de Molodo. La vanne au milieu ne fonctionne pas et des batardeaux ont été mis en place pour éviter des fuites.

Photo : A. Mahieux, mars 2000

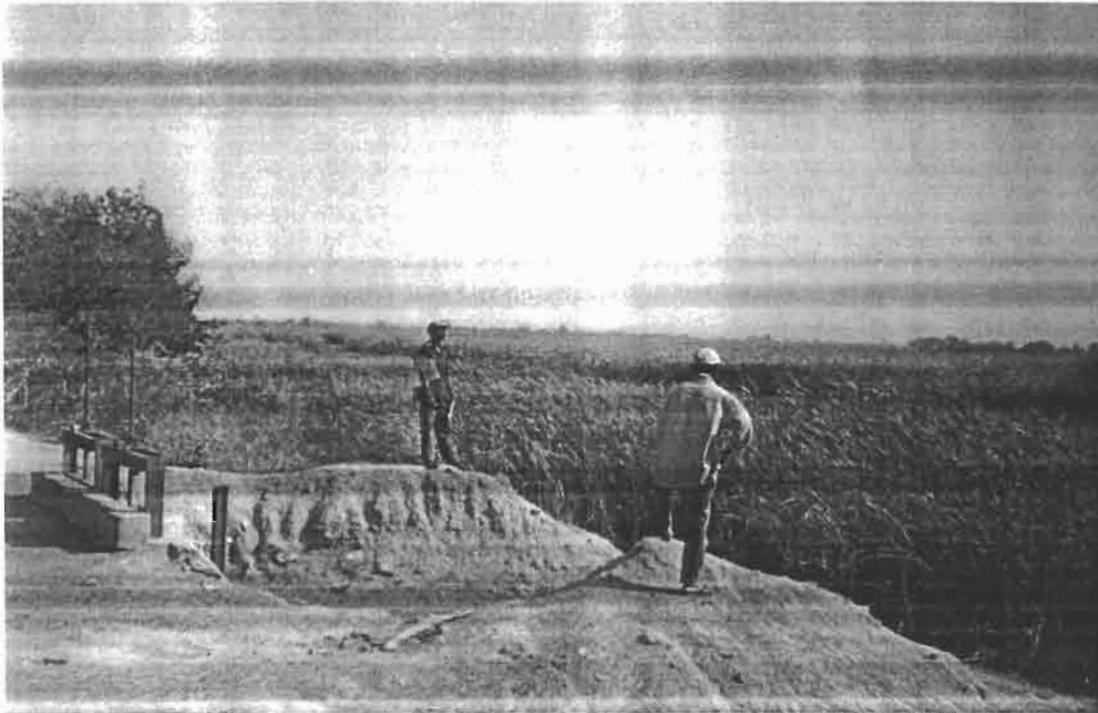
3.2 Modélisation du Canal du Sahel et du Fala de Molodo (1^{ier} bief)



Section en travers de Sienkana, fin du canal du Sahel (PK 24)
Photo : Hassane A., mars 2000



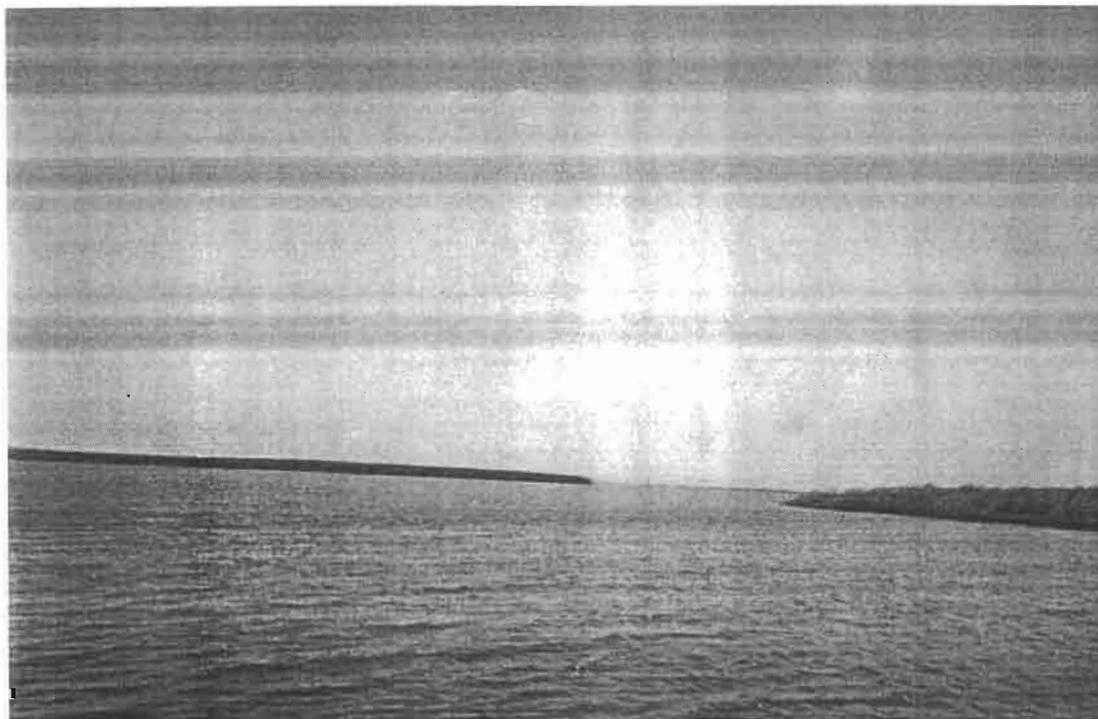
Préparation du zodiac et de l'équipement hydrologique (potence, treuil, saumon) pour faire une section à travers.
Equipe conjointe IRD-Office du Niger, fin du canal du Sahel (PK 24).
Photo : Hassane A., mars 2000



Recherche d'un site pour une section en travers sur le Fala de Molodo. Les exigences sont importantes. Il faut :

- Un repère avec altitude connu
- Un repère kilométrique
- Un accès au Fala

Photo : Hassane A., mars 2000



Le Fala de Molodo en face de la prise de la zone de Molodo et lieu d'une section en travers. On remarque deux grandes îles et l'étendue de la section (presque 1 400 m).

Photo : Hassane A., mars 2000



En aval immédiat du Point B à Niono. La section choisie pour le jaugeage et la section en travers. Le Fala est rétréci, mais on remarque d'importantes étendues de végétation.
Photo : Hassane A., mars 2000



Vue de la prise du Grüber sur le Fala de Molodo en face du village N23. Le Fala de Molodo est à proximité (moins de 500 m).
Photo : Hassane A., mars 2000

ANNEXE 4 : LISTE DU PERSONNEL AYANT PARTICIPE A L'EXPERTISE

L'étude a été réalisée par l'équipe suivante :

Volet réactualisation abaques	Volet modélisation hydraulique	Volet formation
H. Dicko Biga, technicien-hydrologue	H. Dicko Biga, technicien-hydrologue	M. Gréard, hydrologue
M. Gréard, hydrologue	Hassane A., hydraulicien	Hassane A., hydraulicien
K. Koumaré, pinassier	K. Koumaré, pinassier	M. Kuper, hydraulicien
M. Kuper, hydraulicien	M. Kuper, hydraulicien	A. Mahieux, hydrologue
A. Mahieux, hydrologue		
B. Marieu, hydrologue		
D. Orange, hydrologue		

Fala de Molodo à Molodo PK 72
(24+48)

Point GPS : **14°13'42" N 06°00'50" W**

abscisse (m)	cote (m ON)
0,00	298,19
11,66	296,62
22,10	296,13
70,97	295,70
98,62	295,39
117,24	295,22
143,99	295,04
176,38	294,67
216,93	293,81
245,82	293,14
297,43	292,71
322,82	292,90
344,38	293,27
456,66	294,62
464,62	295,06
538,07	295,24
609,28	295,20
679,64	295,05
744,38	295,11
831,74	295,12
895,96	295,22
933,84	295,21
1001,47	295,10
1084,77	294,65
1170,50	294,51
1189,27	294,16
1340,00	296,62
1350,00	298,19

Prise du canal de Molodo sur le Fala de
Molodo

Point GPS : **14°13'42" N 06°00'50" W**

abscisse (m)	cote (m ON)
0,00	297,62
1,00	296,62
3,00	296,35
5,00	295,62
7,00	294,89
9,00	294,10
11,00	293,31
13,00	293,18
15,00	292,98
17,00	292,98
19,00	292,92
21,00	292,98
23,00	293,27
25,00	293,83
27,00	294,26
29,00	294,69
31,00	295,40
33,00	296,26
34,00	296,62
35,00	297,62

Prise du canal Gruber sur le Fala à Niono

Point GPS : **14°13'45" N 05°59'30" W**

abscisse (m)	cote (m ON)
0	296,62
2	296,32
4	296,01
6	295,44
8	294,27
10	293,82
12	293,58
14	293,47
16	293,42
18	293,7
20	293,81
22	294,39
24	294,86
26	295,21
28	295,56
30	296
31,6	296,12
35,6	296,62

Annexe 5.2 Prélèvements des zones de l'Office du Niger

Les données de mars 2000 collectées par la mission d'expertise et traduits en débits sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les débits du premier bief se résument aux prélèvements du Grüber, et l'alimentation du Fala de Molodo en aval du régulateur du Point B ; les hors casiers ne fonctionnent pas en étiage et le périmètre de Molodo est fermé pour la réhabilitation. La totalité des débits prélevés sur le Fala de Molodo en amont du régulateur du Point B concerne donc le canal Grüber. Pour pouvoir évaluer les débits prélevés sur le système du canal du Sahel, nous avons confié aux éclusiers et aiguadier des zones, l'observation toutes les 6 heures du débit ou des paramètres pouvant permettre de le calculer aux points choisis. Ces points concernent :

Le distributeur du Kolodougou,
 Le distributeur du Kouia,
 Le distributeur du Retail,
 Les Partiteurs de Niono desservis par le Grüber Nord,
 Les deux distributeurs de N'Débougou
 Les distributeurs de Molodo
 Le point B.

Le prélèvement de la zone de Molodo se réduit aux fuites, puisque qu'elle est fermée pour des raisons de réhabilitation. Le périmètre du Kolodougou n'est pas équipé d'instruments de mesure permettant d'apprécier les débits, pour cela le service gestion eau de Niono le suppose identique au Kouia. Nous avons adopté ce concept. Les hauteurs d'eau ont été converties avec les abaques utilisés par l'Office du Niger.

Date	Prélèvements Niono (m ³ /s)	Prélèvements N'Débougou (m ³ /s)	Prélèvements Grüber (m ³ /s)	Débit aval Point B (m ³ /s)	Total débits (m ³ /s)
03/03/00 08:00	2,98	7,29	10,27	15,97	26,24
03/03/00 12:00	2,85	6,74	9,59	15,82	25,41
03/03/00 18:00	2,89	6,71	9,61	15,74	25,35
04/03/00 08:00	2,85	6,22	9,07	15,82	24,89
04/03/00 12:00	2,87	3,63	6,50	15,74	22,24
04/03/00 18:00	2,96	5,71	8,67	15,82	24,49
05/03/00 08:00	2,82	5,87	8,69	15,74	24,43
05/03/00 12:00	2,86	5,90	8,77	15,82	24,59
05/03/00 18:00	2,91	5,49	8,40	15,97	24,37
06/03/00 08:00	2,87	5,73	8,60	16,12	24,72
06/03/00 12:00	3,07	3,42	6,49	16,26	22,75
06/03/00 18:00	2,96	5,41	8,38	16,26	24,64
07/03/00 08:00	2,69	9,64	12,34	16,70	29,04
07/03/00 12:00	2,72	10,07	12,79	16,78	29,57
07/03/00 18:00	2,82	9,03	11,85	16,78	28,63
08/03/00 06:00	2,73	6,75	9,49	16,85	26,34
08/03/00 12:00	2,83	15,12	17,96	16,78	34,74
08/03/00 18:00	2,61	15,07	17,68	16,70	34,38
09/03/00 06:00	2,66	13,86	16,52	16,70	33,22

ANNEXE 6 : PROGRAMME DE LA FORMATION EN MODELISATION HYDRAULIQUE

Modélisation hydraulique/Office du Niger

Formation du 24 au 28 avril 2000

Lundi 24 avril (9.00-16.30)

1. Accueil
2. Principes hydrauliques :
 - hydrologie en surface libre (formule de Manning/Strickler)
 - bilan hydrologique
 - ouvrages (écoulement, tarage)
3. Applications :
 - relation Koulikoro-Markala
 - calibrage des ouvrages au Point A et B

Mardi 25 avril (9.00-16.30)

1. Principes de la modélisation hydraulique
2. Collecte de données
3. Déroulement du module 1
4. Travaux pratiques : module géométrique

Mercredi 26 avril (9.00-16.30)

1. Introduction du module 2
2. Travaux pratiques : module permanent

Jeudi 27 avril (9.00-16.30)

1. Introduction du module 3
2. Travaux pratiques : module transitoire

Vendredi 28 avril (9.00-12.30)

1. Introduction : régulation des canaux
2. Formulation des scénarios
3. Travaux pratiques
4. Evaluation de la formation