

DELTA INTÉRIEUR DU NIGER
ÉTUDE HYDROLOGIQUE DE LA MARE DE BATAMANI
(cercle de Kona, région de Mopti)
ANNÉE HYDROLOGIQUE 1998-1999

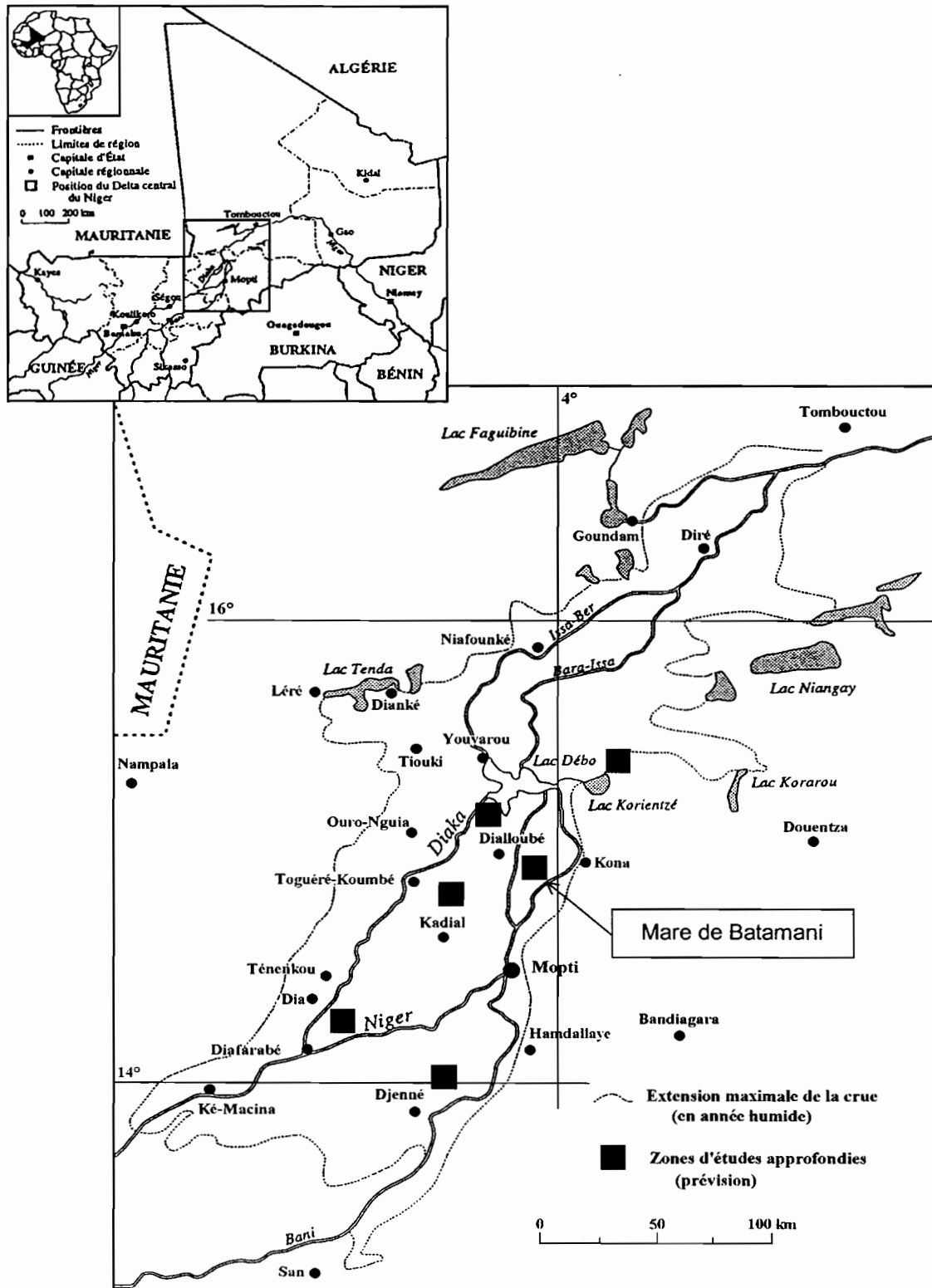
Par Bertrand MARIEU
ingénieur d'études hydrologue

SOMMAIRE

Avant propos	1
1. Rapport d'avancement n° 1 (septembre 1998)	4
1.1 Participants	4
1.2 Calendrier	4
1.3 Dispositif de mesures	4
1.4 Protocole de suivi hydrologique	5
1.5 Bilan de la phase de montée des eaux	6
2. Rapport d'avancement n° 2 (décembre 1998)	7
2.1 Suivi hydrologique	7
2.2 Travaux cartographiques	8
2.3 Analyse des résultats	10
3. Rapport d'avancement n° 3 (avril 1999)	12
3.1 Bilan des travaux hydrologiques réalisés en décrue	12
3.2 Calcul de l'évaporation	14
3.3 Traitement de la pluviométrie et du ruissellement	15
3.4 Bilans hydrologiques	16
4. Synthèse des résultats	18
4.1 Préambule	18
4.2 Analyse des hydrogrammes	18
4.3 Bilan hydrologique définitif	19
4.4 Conclusion	20
ANNEXES	22
<u>Annexe 1.1</u> Liste des jaugeages de crue réalisés dans le canal de Batamani (station du pont)	23
<u>Annexe 1.2</u> Étalonnage de la station du pont sur le canal (en crue)	24
<u>Annexe 2</u> Précipitations journalières à Batamani en mm	25
<u>Annexe 3.1</u> Échelle du Mayo Ninga à Débaré - Hauteurs d'eau moyennes journalières en 1998-99	26
<u>Annexe 3.2</u> Échelle de la mare de Batamani - Hauteurs d'eau moyennes journalières en 1998-99	27
<u>Annexe 3.3</u> Débits moyens journaliers dans le canal en 1998-99	28

Figure 1

Mare de Batamani : carte de situation



1. Rapport d'avancement n° 1 (septembre 1998)

Ce chapitre rend compte des travaux accomplis lors de la phase de montée des eaux.

1.1 Participants

Bertrand MARIEU, hydrologue Orstom
Ibrahima SIDIBE, hydrologue DRHE Mopti
Lamine COULIBALY, stagiaire IPR option Génie Rural
Lamine TRAORE, stagiaire IPR option Génie Rural
Harber DICKO, technicien Orstom
Kaye KOUMARE, pilote Ekwa Neem (bateau Orstom)

1.2 Calendrier

Trois missions Bamako-Batamani via Mopti ont été effectuées sur le site depuis le 7 août 1998.

7-13 août 1998 : B. Marieu, I. Sidibé, L. Coulibaly, L. Traoré, K. Koumaré.

26-31 août 1998 : B. Marieu, I. Sidibé, H. Dicko, K. Koumaré.

15-19 septembre 1998 : B. Marieu, I. Sidibé, K. Koumaré.

L. Coulibaly et L. Traoré ont été basés sur le site du 8 août au 19 septembre pour assurer le suivi hydrométrique quotidien de la mare dans la phase de montée des eaux.

Au cours de ces trois missions, les travaux suivants ont été réalisés :

- mise en place d'éléments d'échelle pour compléter le dispositif,
- nivellement de contrôle des échelles en place et rattachement aux bornes,
- formation des deux stagiaires à la technique du jaugeage au moulinet, sur section aménagée (canal) et naturelle (chenal),
- exploration de l'ensemble de la zone d'inondation dans le but d'identifier les différents flux d'eau entrant et sortant.

1.3 Dispositif de mesures

Le dispositif de mesures limnimétriques se compose de quatre stations d'observation des hauteurs d'eau :

Débaré sur le Mayo Ninga : 2-7 m, cote du « zéro » 253,84 m,

Canal de Batamani au pont : 1-3 m, cote du « zéro » 256,82 m,

Mare-Est : 0-4 m, cote du « zéro » 256,82 m identique à la station du pont,

Chenal-Ouest : 0-3 m, cote du « zéro » 258,02 m.

A noter que les cotes fournies sont des altitudes relatives, déterminées à partir de la borne située près du pont (borne n° 0) dont l'altitude a été fixée arbitrairement à 260 m, aucune borne du Nivellement Général n'existant à proximité.

Une cinquième échelle 0-2 m est implantée dans la mare dite « Débaré fitini » séparée de la mare principale en saison sèche. Elle est très rapidement noyée au cours de la phase de crue et présente donc un intérêt limité.

La station météo automatique Cimel, installée en 1993, enregistre les précipitations ainsi que les paramètres physiques de l'air permettant le calcul de l'évapotranspiration potentielle.

Le dispositif de mesures pluviométriques a été complété en mai 1998 par deux pluviomètres totalisateurs implantés au Nord et au Sud de la zone dans le but d'identifier une éventuelle variabilité spatiale de la pluviométrie sur l'ensemble du site. Un troisième pluviomètre totalisateur, installé en même temps que les deux autres, a disparu entre temps.

1.4 Protocole de suivi hydrologique

Observations limnimétriques :

- bi-quotidiennes (6h00, 18h00) sur le Mayo Ninga, dans le canal et dans la mare-est,
- tous les deux jours dans le chenal-ouest.

Mesures de débit (jaugeages) :

- quotidiennes, voire bi-quotidiennes en cas de forte variation de niveau, dans le canal (associées à des lectures d'échelles dans le canal et sur le Mayo Ninga)
- occasionnelles, en fonction de l'écoulement, dans le chenal ouest.

Toutes les mesures sont effectuées par exploration du champ des vitesses au moyen d'un moulinet ou d'un micro-moulinet relié à un compteur d'impulsion.

Lors des jaugeages effectués dans le canal, les éventuelles interventions humaines (mise en place de batardeaux ou de barrages à poissons en terre) sont notées.

Relevés pluviométriques :

- quotidiens et automatiques sur la station météo,
- hebdomadaires sur les pluviomètres totalisateurs.

1.5 Bilan de la phase de montée des eaux

42 mesures de débits entrants dans la mare ont été effectuées dans le canal. Ces mesures ont permis l'établissement d'une courbe d'étalonnage dite « à dénivellée normale» (cf annexe 1.1 et 1.2).

Aucune mesure de débit n'a pu être effectuée dans le chenal ouest (vitesses trop faibles et section envahie de bourgou dès le début de l'inondation). Les quelques mesures de vitesses réalisées donnent des valeurs très faibles, de l'ordre du cm/s, dans le sens est-ouest. D'après les relevés d'échelles, la dénivellée du plan d'eau entre l'est et l'ouest de la mare était de 3 cm le 24 août et de 1 à 2 cm le 16 septembre. Il est probable que cette dénivellée ainsi que le courant s'inversent au moment de la décrue.

Ces observations laissent supposer que le chenal-ouest ne joue, dans la configuration actuelle du site, plus aucun rôle actif dans l'alimentation de la mare de Batamani.

A partir de la cote 580 cm dans le Mayo Ninga, l'eau drainée par celui-ci s'engouffre dans la mare par des points bas situés le long des berges. Le plus important de ces chenaux intermittents se situe à environ 200 m au Sud du village de Débaré. Il a été jaugé le 18 septembre alors que la cote du Mayo Ninga était de 627 cm : $Q = 934 \text{ l.s}^{-1}$, soit un débit équivalent à celui transitant par le canal.

A noter que cette cote de 627 cm est égale au maximum atteint en 1997 (le 16 octobre).

A partir du moment où le niveau d'eau dans le Mayo Ninga dépasse la cote approximative de 600 cm, de nombreux chenaux naturels se mettent en eau à la périphérie du site et il devient alors très difficile voire illusoire d'estimer le débit entrant dans la mare. On peut considérer que commence alors une seconde phase, venant après la phase de crue et d'inondation dynamique, qu'on pourrait qualifier d'inondation générale ou pseudo-permanente.

Le cumul pluviométrique au 18 septembre était de 306,5 mm. Les relevés effectués sur les pluviomètres totalisateurs montrent une grande homogénéité des précipitations sur la zone d'étude.

2. Rapport d'avancement n° 2 (décembre 1998)

Ce rapport rend compte des travaux accomplis dans le cadre de l'étude hydrologique de la mare de Batamani depuis le 19 septembre 1998, et dresse un premier bilan des résultats obtenus.

2.1 Suivi hydrologique

Le suivi hydrométrique depuis la publication du précédent rapport a consisté essentiellement en des relevés limnimétriques effectués conformément au protocole adopté depuis le début de la campagne de mesures (cf rapport n° 1).

L'échelle du canal a cessé d'être observée à partir du 18/09/98. Le pont étant submergé, les lectures sont effectuées sur l'élément supérieur de l'échelle de la mare (élément 3-4 m).

Le sens du courant dans le canal s'est inversé à partir du 20/09/98, la phase d'alimentation de la mare par le canal se terminant ainsi à cette date ($H = 327$ cm).

Une mesure du débit sortant de la mare par le canal a été réalisée le 4/10/98 par Harber Dicko :

$$H = 346 \text{ cm} \quad Q = 3,11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le maximum de niveau d'eau a été atteint le 29/10/98 :

$$H_{\text{Ninga}} = 673 \text{ cm}$$

$$H_{\text{mare}} = 369 \text{ cm}$$

Le niveau est resté stable jusqu'au 4/11/98, date à laquelle la décrue a commencé.

Dans cette phase de décrue, un programme de mesures du débit transitant par le canal a été mis en oeuvre : 2 mesures hebdomadaires jusqu'au 15 décembre, mesures ponctuelles ensuite. Les deux premiers jaugeages de décrue ont donné les résultats suivants :

- le 21/11/98, $H = 340$ cm, $Q = 2,39 \text{ m}^3/\text{s}$ (B. Marieu, H. Dicko),
- le 26/11/98, $H = 322$ cm, $Q = 2,21 \text{ m}^3/\text{s}$ (M. Gréard, B. Togola).

Les données de pluviométrie collectées par la station CIMEL ont été dépouillées en octobre 1998. Elles sont récapitulées dans le tableau présenté en annexe 2.

2.2 Travaux cartographiques

Le levé topographique effectué par Kabirou Maman en avril-mai 1998 a été digitalisé par Lamine Dembélé, étudiant de l'ENSUP, pour constituer un fichier numérique traité au moyen du logiciel *Surfer* pour le tracé automatique des courbes de niveau et le calcul des surfaces et des volumes.

Ce travail a permis d'établir des courbes surface/hauteur et volume/hauteur plus précises que celles obtenues par planimétrie des courbes de niveau sur papier (voir figures ci-après). Ces courbes ont ensuite servi à la détermination d'un premier bilan hydrologique (voir § 2.3).

Figure 2

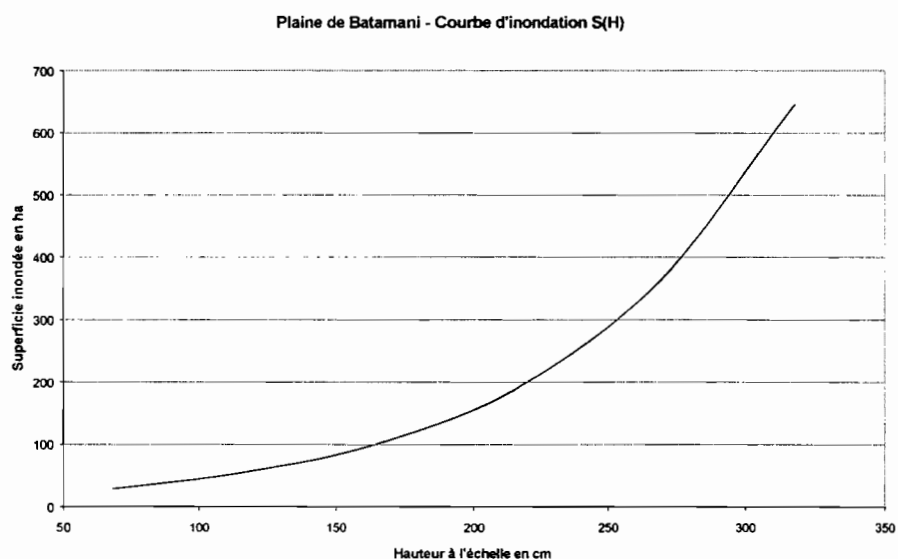
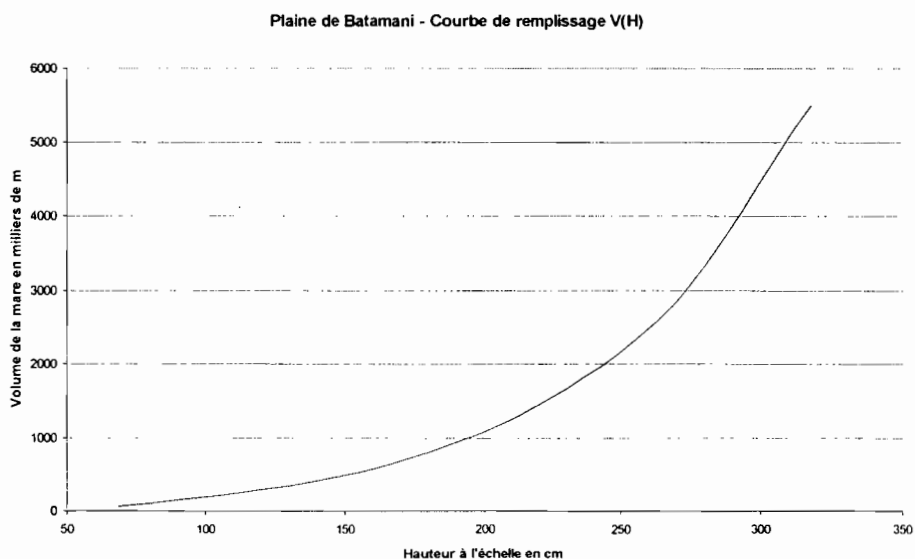
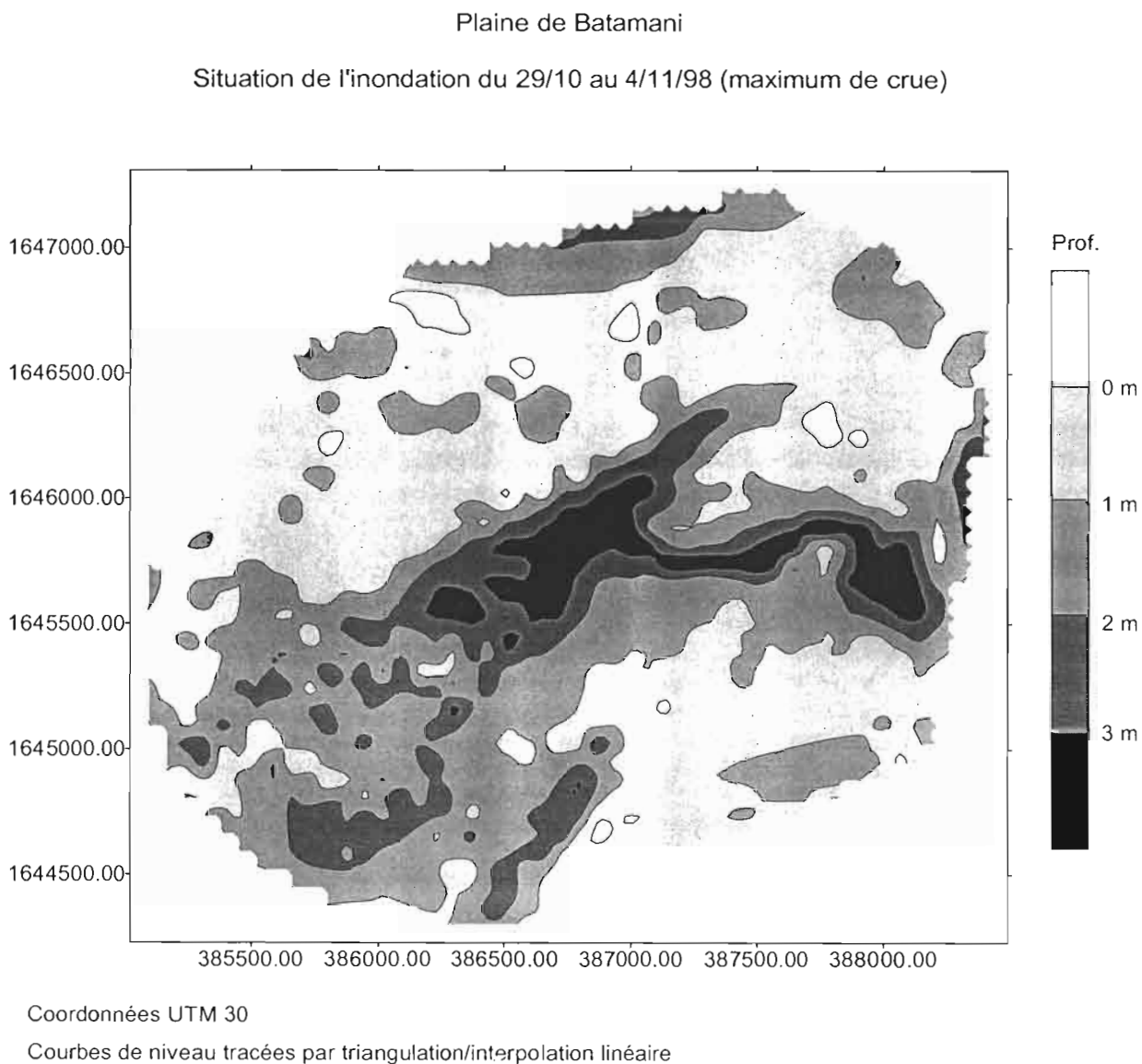


Figure 3



Du point de vue cartographique, à partir du fichier numérisé des points cotés (environ 1200 points) et du logiciel *Surfer*, il a été possible de réaliser des cartes d'inondation telles que celle présentée ci-dessous montrant l'état de la plaine de Batamani au maximum de la crue de 1998 (K. Maman & B. Marieu, 1998).

Figure 4



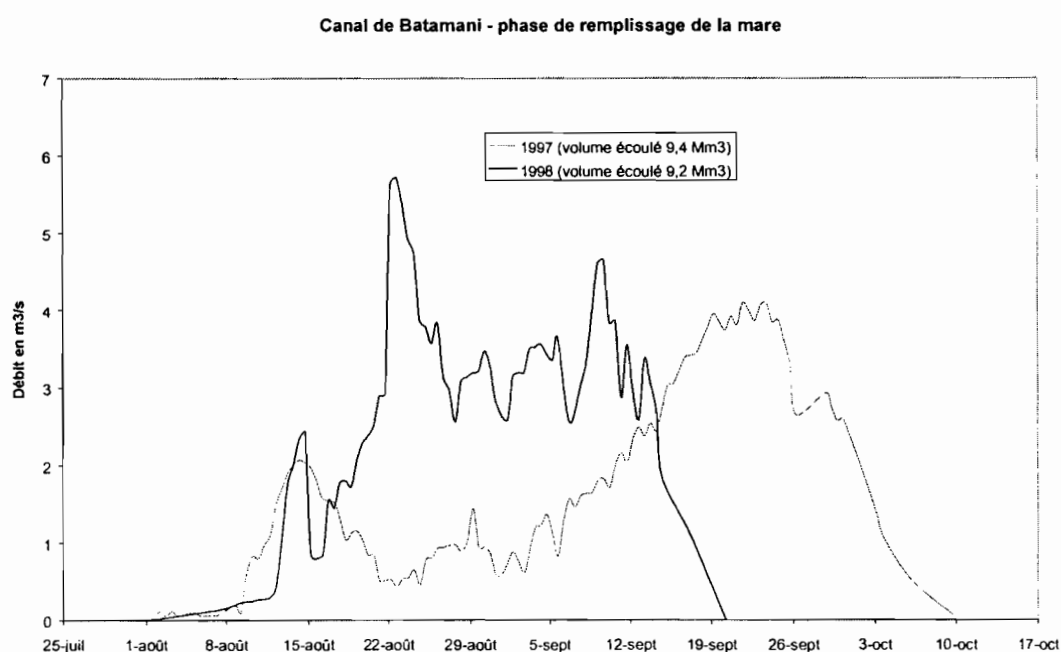
2.3 Analyse des résultats

En première analyse, il apparaît clairement que le cycle hydrologique de la mare de Batamani, qui constitue un hydro-système aménagé, comporte 4 phases distinctes :

- phase de remplissage (du 9 août au 20 septembre en 1998),
- phase d'inondation généralisée en crue (du 20 septembre au 4 novembre en 1998),
- phase de vidange (à partir du 4 novembre en 1998),
- phase d'assèchement par évaporation (à partir de la fin de l'écoulement dans le canal).

A noter que la deuxième phase n'existe que dans le cas d'une crue d'ampleur suffisante, permettant une alimentation de la mare par les chenaux naturels, notamment le chenal du Shiéni, situé à l'extrémité Ouest de la plaine de Batamani. Si on se réfère aux résultats obtenus en 1997 et 1998, il semble que le début de l'alimentation de la mare par les chenaux naturels corresponde approximativement à l'inversion du sens du courant dans le canal. On peut situer ce point de rupture à la cote de 325 cm à l'échelle de la mare. En 1984, année de la plus faible crue du Niger enregistrée à Mopti, il semble que cette cote n'aurait pas été atteinte (à l'époque le canal n'existait pas). Cette information est corroborée par certains témoignages qui mentionnent l'absence d'inondation de la mare cette année là.

Figure 5



L'analyse de l'hydrogramme en phase de remplissage permet d'estimer le volume d'eau ayant transité dans la mare par le canal à 9,2 millions de m³. La même analyse sur l'hydrogramme de 1997 donne un résultat très proche (voir figure 5) mais avec un temps de base plus grand. On peut supposer que cette valeur de 9 millions correspond à la capacité maximale de remplissage de la mare par le canal et que cette valeur est indépendante des caractéristiques de la crue annuelle du Niger.

En ce qui concerne la phase de vidange, il est probable qu'on puisse distinguer une période de décrue précédant une période de tarissement comme c'est généralement le cas pour les cours d'eau naturels. Les mesures à venir permettront de préciser ces mécanismes hydrologiques.

L'ensemble des résultats obtenus permet de proposer un premier bilan hydrologique présenté dans le schéma ci-dessous. Ce bilan pourra être précisé en estimant l'évapotranspiration réelle à partir des données acquises par la station CIMEL.

Bilan hydrologique provisoire

(phase de remplissage, du 9 août au 20 septembre 1998)

Volume précipité en millions de m ³	0,8
Volume écoulé dans le canal en millions de m ³	9,2
Volume de la mare au 20/09/98 en millions de m ³	6,2
Pertes (évaporation, infiltration, débordements) en millions de m ³	3,8

3. Rapport d'avancement n° 3 (avril 1999)

Ce rapport s'inscrit dans la continuité des deux précédents. Il est consacré pour une grande part à l'étude de la vidange de la mare. Y figure également un chapitre consacré au calcul de l'évaporation qui nous a permis de compléter le bilan hydrologique de la phase de remplissage. Le traitement de la pluviométrie a également subi quelques changements, notamment par l'introduction de la notion d'impluvium, concept comparable à celui de bassin versant.

3.1 Bilan des travaux hydrologiques réalisés en décrue

La décrue commencée le 5 novembre a fait l'objet d'un suivi limnimétrique identique à celui réalisé précédemment :

- lectures bi-quotidiennes des échelles de Débaré, Pont, Mare-Est,
- lectures occasionnelles à la station de Shio (dénommée Mare-Ouest dans les précédents rapports).

En raison de problèmes matériels, ce suivi a été interrompu du 17/12/1998 au 27/01/99.

La campagne de mesures s'est achevée le 12 mars 1999.

Parallèlement aux lectures de l'échelle au pont, ont été notées des observations relatives à la gestion de l'ouvrage par les villageois.

Ces observations sont les suivantes :

Le 25/11/98 : pose d'une grille verticale dans le canal en aval immédiat du pont.

Le 03/12/98 : mise en place d'un barrage à poissons en « sékos¹ » en amont du pont (côté mare).

Le 05/12/98 : barrage du canal au niveau du pont au moyen de 8 batardeaux.

Le 27/01/99 : on constate que seuls subsistent 4 batardeaux. Les villageois, de toute évidence, retirent ceux-ci au fur et à mesure de la baisse du niveau d'eau.

Le 28/01/99 : retrait d'un autre batardeau.

Le 09/02/99 : retrait d'un autre batardeau.

Le 12/03/99 : 2 batardeaux encore présents. La grille mentionnée plus haut est restée en place durant toute cette période.

Des mesures de débit ont été réalisées en décrue dans le canal. Elles sont beaucoup moins nombreuses que celles réalisées pendant la phase de montée des eaux (cf rapport n° 1), mais suffisantes cependant pour permettre l'établissement d'une courbe de tarage Q(H) en vidange. Le tableau ci-après récapitule ces mesures auxquelles a été ajouté un jaugeage réalisé en février 1998.

¹ Séko : paille tressée

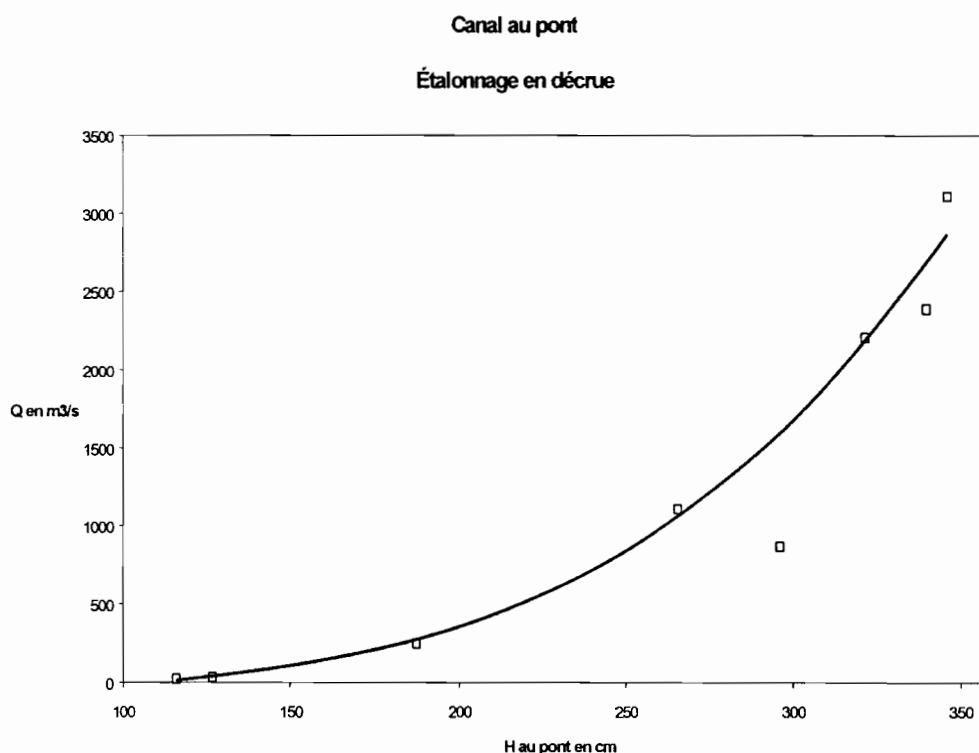
Tableau 1 : liste des jaugeages de décrue réalisés dans le canal de Batamani

Date	H Pont (cm)	H Mare (cm)	Débit (l.s-1)	Auteur(s)	Remarques
13/02/98	127	142	34	Marieu	
04/10/98	346	346	3110	Dicko	réalisée en crue (1)
21/11/98	340	340	2390	Marieu, Dicko	
26/11/98	322	322	2210	Gréard	
02/12/98	296	298	868	Togola	
17/12/98	266	267	1110	Gréard	
19/01/99	187	190	250	Dicko, Sidibé	
21/02/99	116	138	25	Benech	

(1) mesure effectuée alors que le sens du courant dans le canal était Ouest-Est, mais avant que la décrue n'ait commencé.

A partir de ces mesures a été établi un étalonnage prenant en compte la non-univocité « anthropique » de la station (relation Q(H) instable du fait des interventions humaines). On note cependant une assez bonne répartition des points autour d'une courbe moyenne (cf figure 6).

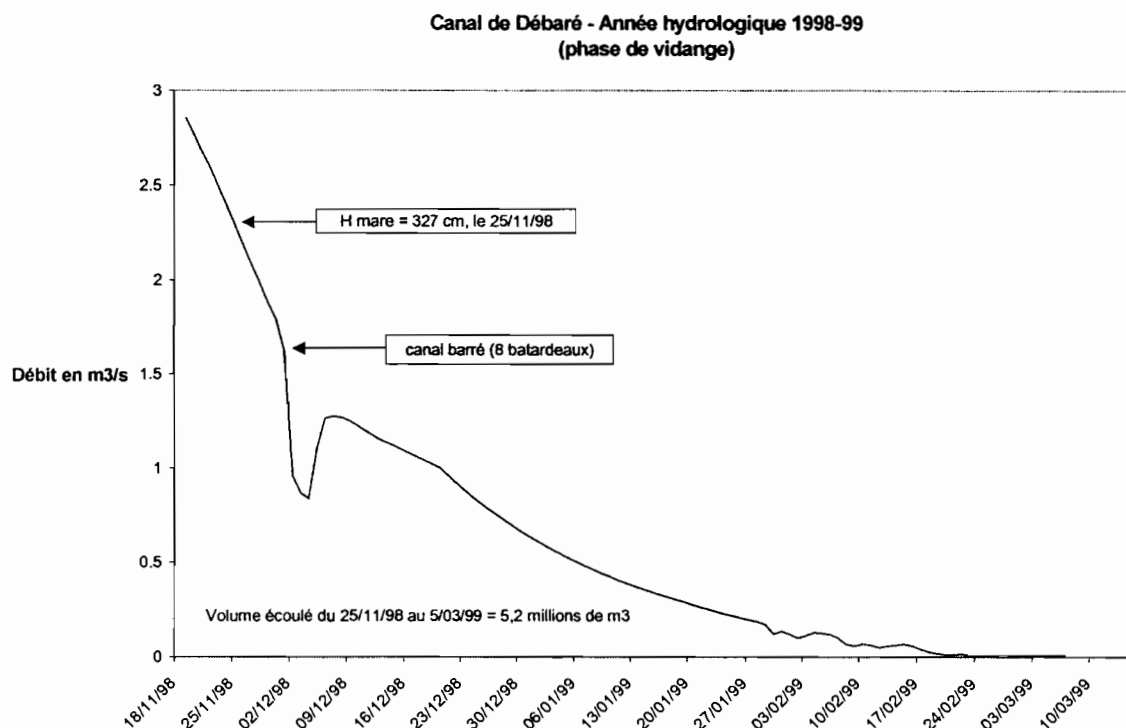
Figure 6



La courbe de la figure 6 permet la détermination de l'hydrogramme de vidange dans le canal, présenté sur la figure 2. La vidange de la mare débute avec la décrue du Niger le 5/11/98, mais le débit dans le canal n'est mesurable qu'à partir du 20/11/98 environ. L'écoulement devient insignifiant début mars (quelques litres par seconde). A cette date, la cote à l'échelle de la mare est de 120 cm, ce qui correspond à un volume d'eau résiduel de 270 000 m³. Au début du remplissage, le 8/08/98, la cote dans la mare était de 39 cm, soit un volume d'eau d'environ 5 000 m³.

La hauteur d'eau égale à celle atteinte à la fin de la phase de remplissage (327 cm, cf rapport 2) est observée le 25/11/98. Le volume écoulé à partir de cette date jusqu'à la fin de l'écoulement est de 5,2 millions de m³.

Figure 7



On trouvera en annexe les tableaux récapitulatifs des hauteurs et débits enregistrés depuis le début de la campagne sur les différentes stations.

3.2 Calcul de l'évaporation

L'évapotranspiration potentielle (Etp) a été déterminée à partir de la formule de Penman-Monteith en utilisant les paramètres climatologiques enregistrés par la station CIMEL. Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-après. Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel *Cropwat* édité par la FAO.

Sur une surface d'eau libre, l'évaporation réelle est égale à l'évaporation potentielle. En admettant que ce principe s'applique à des zones envahies de végétation telles que les bourgoutières, il est possible d'estimer le volume total évaporé à partir du plan d'eau, en utilisant la relation S(H) précédemment établie (cf rapport n° 2) et la chronique d'observation des hauteurs d'eau. Le résultat de ce calcul donne un volume total évaporé entre le 1^{er} août et le 20 septembre s'élevant à 980 000 m³. Cette valeur constitue un élément supplémentaire du bilan hydrologique esquissé dans le rapport 2.

Tableau 2 : Etp journalière à Batamani pour l'année hydrologique 1998-99

Mois	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humid. rel. (%)	Vit. tot. du vent (Km)	Rayon ¹ Sol. (MJ/m ² /jour)	Etp PenMon (mm/jour)
Mai	44,0	24,4	49	247	27,9	9,3
Juin	43,3	19,3	63	296	27,5	9,5
Juillet	40,9	21,0	76	250	27,6	7,9
Août	38,9	20,8	86	238	27,8	7,1
Septembre	36,0	21,7	92	186	27,2	6,0
Octobre	35,8	23,3	84	127	25,5	5,6
Novembre	33,7	16,1	71	145	23,4	5,2
Décembre	39,2	10,5	54	167	22,2	5,9
Janvier	34,6	9,8	55	252	22,9	6,5
Février (1)	40,0	13,3	34	282	25,0	8,7
Mars (1)	42,7	12,4	28	266	27,1	9,6
Avril (1)	45,8	19,1	36	215	28,0	9,2

(1) données 1998 (données 1999 non disponibles)

3.3 Traitement de la pluviométrie et du ruissellement

Dans le rapport précédent, nous n'avons pris en compte dans le bilan hydrologique que le volume précipité sur la surface en eau.

Peut-être convient-il de ne pas négliger l'existence d'un volume d'eau ruisselé. Pour cela, nous avons tracé les limites de l'impluvium de la mare de Batamani, site qui peut s'apparenter à un bassin endoréique.

La superficie de ce bassin, déterminée après numérisation de son contour est de 4,8 km².

Pour chaque pluie susceptible de provoquer du ruissellement ($P > 10$ mm), nous avons déterminé, à partir des cartes d'inondation tracées automatiquement à l'aide du logiciel *Surfer*, la superficie exondée du bassin.

Nous avons ensuite attribué à chaque pluie un coefficient de ruissellement conforme aux caractéristiques de ce type de bassin (méthode Rodier *in* « Bulletin d'irrigation et de drainage FAO n°54 : Crues et apports – Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche, Rome 1996 »).

Les résultats de ces calculs sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : estimation du volume ruisselé dans la mare

Date	H mare (cm)	Surface exondée (ha)	P (mm)	Kr (%)	Vr (m ³)
3/08/98	40	480	30	15	21 500
12/08/98	65	460	23	10	10 500
4/09/98	288	95	10	5	500
7/09/98	300	52	72	40	15 000

11/09/98	309	32	18	10	600
14/09/98	319	20	16	10	300
20/09/98	329	12,5	14	10	180
22/09/98	333	11	17,5	10	200

Total 48 780 m³

3.4 Bilans hydrologiques

Les calculs présentés dans les paragraphes précédents permettent de préciser le bilan hydrologique en phase de remplissage.

Par ailleurs, une partie des apports contribue à alimenter le volume d'eau stocké dans le sol. Le sol étant essentiellement argileux, sa porosité peut être estimée à 15 %. La variation du volume de sol imprégné entre le 1^{er} août et le 20 septembre a pu être estimée à partir de la topographie à $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ce qui donne une variation du volume d'eau stockée dans le sol de $2,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

On aboutit alors au bilan représenté par la figure 8 pour la phase de remplissage.

Durant la phase d'inondation généralisée (cf rapport 2), il nous semble impossible d'établir un bilan hydrologique quelconque, la mare de Batamani étant en relation avec l'ensemble du delta intérieur du Niger ! En 1998-99, cette période débute le 20 septembre et s'étend jusqu'au 24 novembre, date à partir de laquelle la vidange de la mare s'effectue principalement par le canal de Débaré². Commence alors la troisième des quatre phases du cycle hydrologique précédemment identifiées (cf rapport 2) baptisée « phase de vidange ».

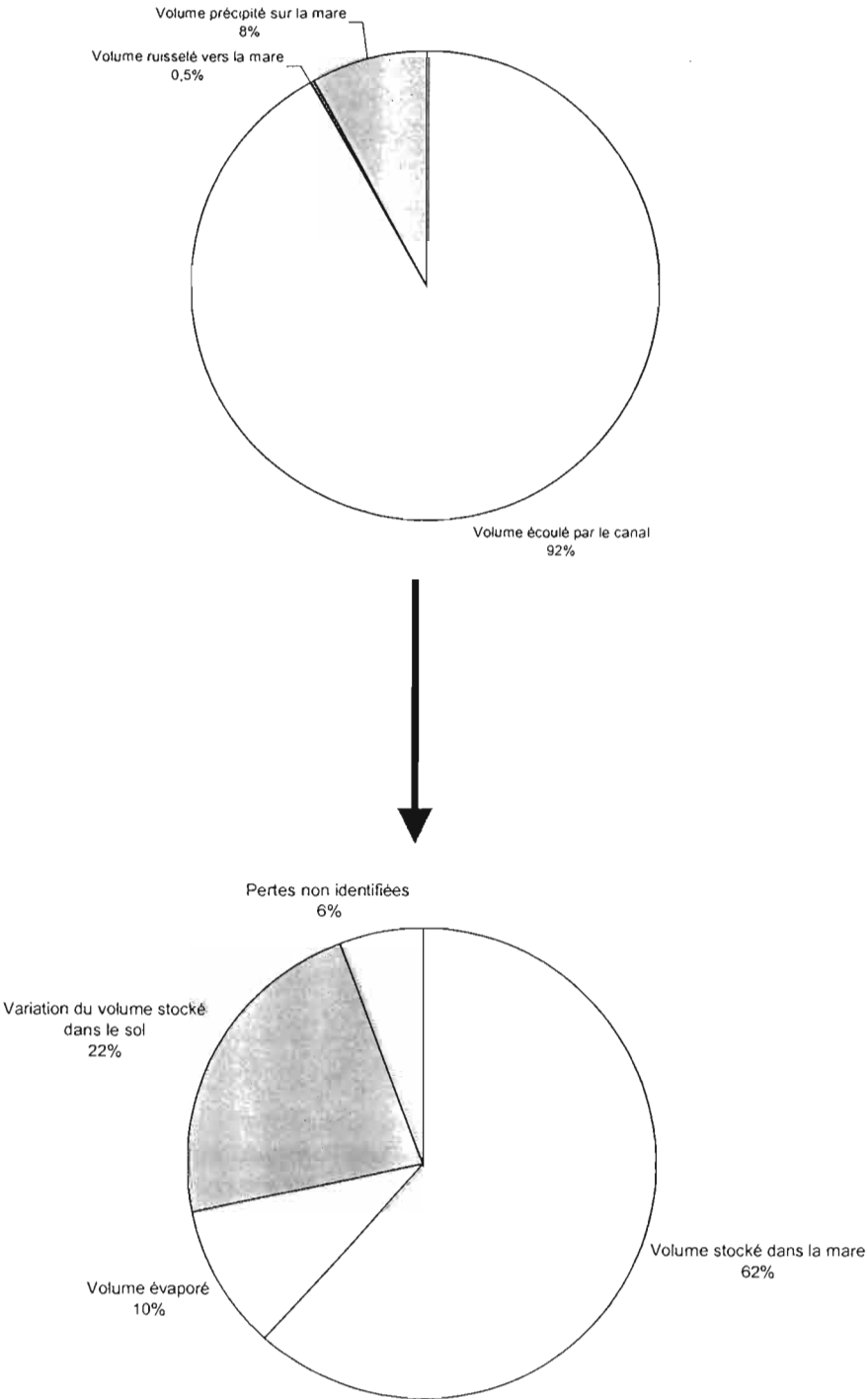
A noter que la phase de vidange se déroule hors saison des pluies, celle-ci se terminant début octobre dans la zone de Batamani (le 2 octobre en 1998). Les termes du bilan hydrologique au cours de cette période sont les suivants :

- volume écoulé par le canal = $5,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$,
- volume évaporé = $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$,
- variation du volume d'eau libre = $- 5,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$,
- variation du volume d'eau stockée dans le sol = $-1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ environ.

La quatrième et dernière phase du cycle hydrologique débute lorsque le canal est à sec et s'étend jusqu'à la mise en eau du canal provoquée par la crue du Niger, 4 à 5 mois plus tard. Nous l'avons nommée « phase d'évaporation » car ce terme du bilan hydrologique est alors le plus important.

² Débaré est le village proche du canal, Batamani désignant l'ensemble de la zone étudiée.

Figure 8 : origine et destination des apports en eau dans la mare de Batamani



4. Synthèse des résultats

4.1 Préambule

La principale difficulté pour traiter un bassin endoréique tel que celui de la mare de Batamani réside dans ses limites mal définies et surtout variables. Ainsi, d'après la carte au 1/5000^{ème} réalisée en juin 1998, nous avons estimé la surface du bassin *sensu stricto*³ à environ 4,8 km². Cependant, compte tenu du relief extrêmement plat et des nombreux débordements, la zone d'influence du canal d'alimentation dépasse largement les limites de ce bassin. C'est pourquoi, pour certains calculs, notamment ceux concernant les précipitations et l'évaporation, nous avons pris en compte l'ensemble de la zone cartographiée qui couvre une superficie de 7,5 km². Ces changements dans le choix des limites peuvent être à l'origine d'imprécisions qui apparaissent dans le bilan hydrologique final (cf § 4.3).

4.2 Analyse des hydrogrammes

Hydrogramme de crue ou de remplissage (figure 5, § 2.3) :

Pour la phase de remplissage, on dispose des hydrogrammes $Q(t)$ pour deux années consécutives (1997 et 1998). Le principal enseignement qu'on peut tirer de la comparaison de ces deux graphiques est l'identité du volume écoulé (environ 9 millions de m³). Cette valeur correspond certainement à un équilibre hydrodynamique entre la mare et le Mayo Ninga. On note en effet qu'à partir de la fin du remplissage, les niveaux statiques de la mare et du Mayo sont identiques jusqu'à ce que la décrue soit engagée.

En 1998, le temps de base est de 50 jours contre 70 en 1997, ce qui s'explique par la crue du Niger dont le temps de montée a été beaucoup plus court en 1998 qu'en 1997. Le remplissage étant plus rapide en 1998, la valeur critique de 9 millions de m³ est atteinte plus tôt qu'en 1997.

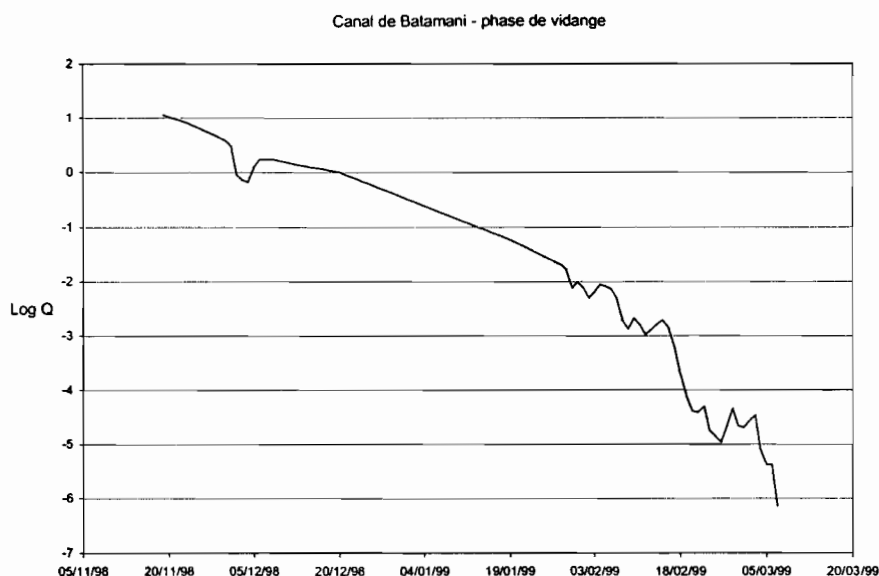
Hydrogramme de décrue ou de vidange (figure 7, § 3.1) :

L'inversion du sens du courant dans le canal est presque instantanée. En 1998, elle s'est produite le 20 septembre. A noter que cette inversion intervient bien avant le début de la phase de vidange, alors que le niveau de l'eau continue à monter. La vidange ne commence qu'avec la décrue du Niger (le 5 novembre en 1998). Le débit baisse fortement au début, puis plus lentement. La transformation logarithmique des débits (voir figure 9) permet de distinguer une phase de décrue proprement dite qui s'étend du 5/11/98 au 20/12/98 et une phase de tarissement qui débute approximativement le 20 décembre (coefficient de tarissement⁴ égal à 0,0425). Cette deuxième phase dure théoriquement jusqu'à l'assèchement complet du canal. Les débits sont fortement perturbés à partir du mois de février du fait des interventions villageoises destinées à retarder la vidange de la mare au moyen de petits barrages.

³ Par ce terme on désigne la surface de collecte des eaux pluviales convergeant vers la mare (également nommée *impluvium* dans un chapitre précédent).

⁴ Formule du tarissement : $Q_t = Q_0 \cdot e^{-at}$ avec a le coefficient de tarissement

Figure 9



4.3 Bilan hydrologique définitif

Au cours d'un cycle hydrologique annuel, en admettant une situation finale identique à la situation initiale (hauteurs d'eau similaires dans la mare en début et fin de cycle), ce qui fût le cas en 1998-99, on a alors une variation du volume d'eau stockée (eau libre et eau fixée dans le sol) $\Delta V = 0$. Les termes du bilan hydrologique se limitent alors à :

- P, volume précipité sur la mare,
- V_e , volume écoulé par le canal,
- V_r , volume ruisselé vers la mare,
- E, volume évaporé,
- Δr , variations des réserves (pertes ou gains)

Arbitrairement, on admet que le terme V_e est positif dans le sens «remplissage» et négatif dans le sens «vidange».

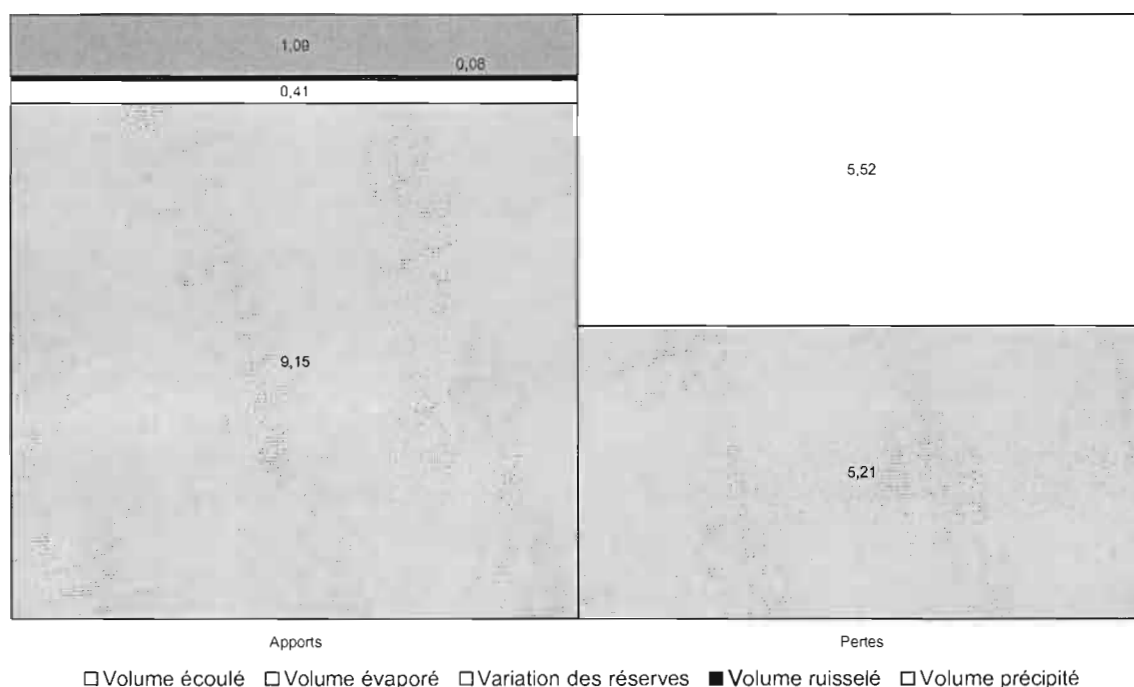
L'ensemble des mesures et calculs effectués (cf § 1, 2 et 3) nous ont permis d'établir pour l'année hydrologique 1998-99 le bilan représenté page suivante.

Le terme Δr représente 4 % du volume total des apports. Il s'agit en réalité d'un terme correcteur n'ayant guère de signification hydrologique. On peut supposer qu'il vient compenser une surestimation des pertes. Le volume sortant de la mare ayant été calculé sur la base de mesures de débit avec une erreur relative faible, il est probable que c'est le volume évaporé qui a été surestimé d'environ 7 %.

Quoi qu'il en soit, ce bilan montre que 50% du volume d'eau piégé par la mare est perdu par évaporation.

Mare de Batamani

Bilan hydrologique – Année 1998-99
(valeurs en millions de m³)



4.4 Conclusion

Le site de la mare de Batamani constitue un système fermé jusqu'à la cote 330 cm environ à l'échelle de la mare. La superficie du bassin peut être estimée à 4,8 km². Au delà de cette cote, il s'agit d'un système ouvert dont la superficie varie avec l'altitude du plan d'eau. Ne pouvant alors fixer de limites physiques à l'hydro-système, nous avons choisi de traiter le domaine cartographié qui correspond approximativement du point de vue socio-économique au « terroir » de Batamani.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- au cours de l'année hydrologique, environ 10 millions de m³ d'eau ont transité dans la mare,
- le volume amené par le canal représente presque 90% des apports,
- 50% du volume entré dans la mare est évaporé (environ 5 millions de m³),
- le ruissellement représente moins de 1 % des apports (estimation).

Par ailleurs, nous avons pu identifier 7 phases constitutives du cycle hydrologique, récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : phases du cycle hydrologique à Batamani

N°	date début – date fin	Dénomination	Régime du Niger
1	01/08/98 ⁵ – 19/09/98	Remplissage	Crue
2	20/09/98 – 28/10/98	Inondation	Crue
3	29/10/98 – 04/11/98	Inondation	Étale
4	05/11/98 – 24/11/98	Inondation	Décru
5	25/11/98 – 20/12/98	Vidange	Décru
6	21/12/98 – 07/03/99	Tarissement	Décru
7	08/03/99 – 31/07/99	Assèchement	Étiage

A ces différentes phases correspondent des cotes caractéristiques :

- H = 400 cm (Mayo Ninga), mise en eau du canal (début du remplissage, fin de la vidange) ;
- H = 600 cm (Mayo Ninga), début de l'inondation généralisée ;
- H = 630 cm (Mayo Ninga) ou 330 cm (Mare), inversion du sens du courant dans le canal ;
- H = 260 cm (Mare), début de la vidange par tarissement.

L'actuel canal d'alimentation permet une alimentation précoce de la mare à partir du Mayo Ninga. Avant le creusement de ce canal, l'inondation de la plaine de Batamani était totalement tributaire de la crue du Niger et il est manifeste que, lors des années de faible hydraulicité du Niger, celle-ci pouvait être insuffisante pour la mise en eau de la mare.

Dans la configuration actuelle du site, le Niger ne contribue directement aux apports qu'à partir de la cote 330 cm à l'échelle de la mare. A cette cote, l'inondation est générale, le canal est immergé et n'a plus aucune fonction d'alimentation, et la notion même de « mare » n'a plus de réelle signification hydrologique.

Il convient enfin de souligner les deux résultats les plus marquants de cette étude qui sont d'une part l'importance capitale du canal dans l'alimentation de la mare et dans la gestion de la ressource en eau, et d'autre part le rôle considérable joué par l'évaporation, responsable de la perte de la moitié du volume d'eau piégé dans la mare au cours du cycle hydrologique.

⁵ Date estimée, les observations n'ayant débuté que le 9 août.

ANNEXES

Annexe 1.1

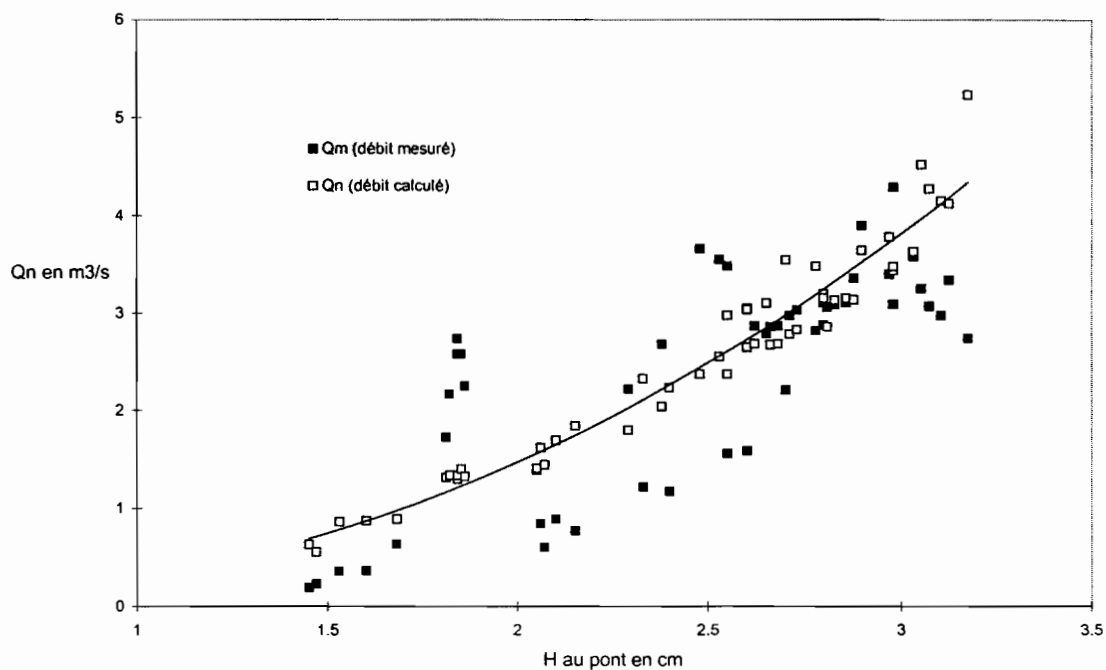
Liste des jaugeages de crue réalisés dans le canal de Batamani (station du pont)

Date	Heure	H Canal (cm)	Q (m3/s)	Observation
09/08/98	10:00	145	0,193	
09/08/98	17:00	147	0,233	
10/08/98	16:30	153	0,362	
11/08/98	16:20	160	0,367	2 batardeaux
12/08/98	17:05	168	0,64	
13/08/98	16:50	182	2,17	
14/08/98	06:30	185	2,58	
14/08/98	16:35	184	2,58	
15/08/98	07:00	184	2,74	
15/08/98	15:15	205	0,511	5 batardeaux
16/08/98	07:00	206	0,848	5 batardeaux
16/08/98	17:00	207	0,605	5 batardeaux
17/08/98	06:50	205	1,39	5 batardeaux
21/08/98	07:00	229	2,22	5 batardeaux
22/08/98	06:50	238	2,68	5 batardeaux
25/08/98	16:10	248	3,66	
26/08/98	06:50	253	3,55	
26/08/98	16:50	255	3,48	
27/08/98	06:45	260	3,05	
27/08/98	16:30	262	2,87	
28/08/98	07:20	265	2,79	
28/08/98	16:20	266	2,86	
29/08/98	06:45	268	2,87	
30/08/98	07:05	271	2,98	
31/08/98	06:55	273	3,03	
01/09/98	06:55	278	2,82	
02/09/98	06:50	280	2,88	
03/09/98	07:10	281	3,06	
04/09/98	07:05	283	3,09	
05/09/98	06:55	286	3,11	
06/09/98	09:00	288	3,36	
07/09/98	10:45	298	3,09	
08/09/98	07:00	297	3,40	
09/09/98	07:00	298	4,29	
10/09/98	06:40	303	3,58	
11/09/98	07:00	307	3,07	
12/09/98	07:20	310	2,98	
13/09/98	06:50	312	3,34	
14/09/98	07:00	317	2,74	Pont submergé
15/09/98	06:55	323	1,52	Pont submergé
16/09/98	08:35	325	1,68	Pont submergé
17/09/98	07:00	327	1,08	Pont submergé

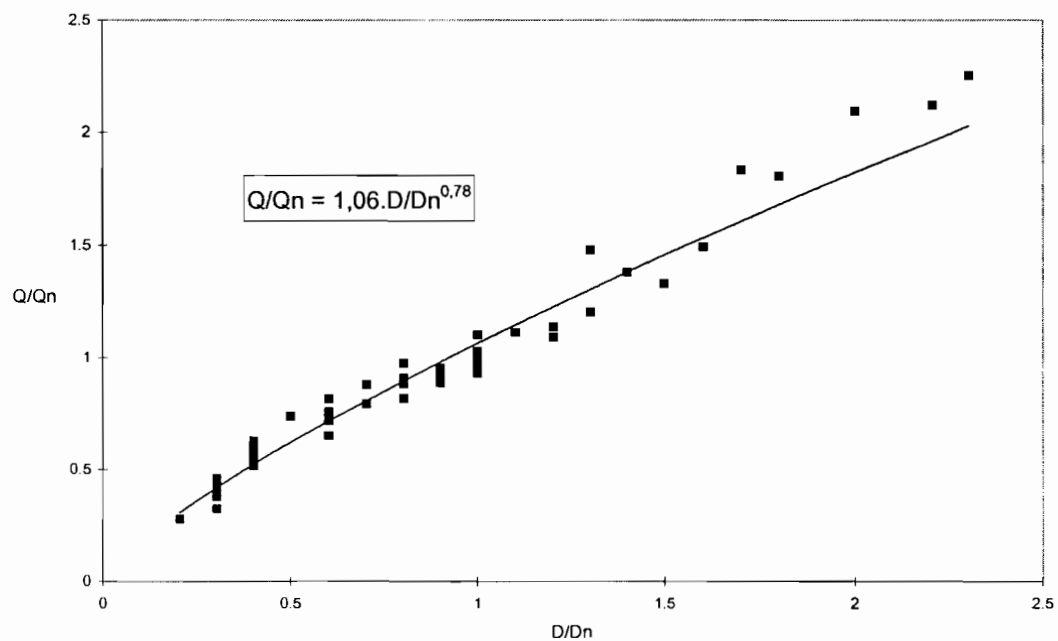
Annexe 1.2

Étalonnage de la station du pont sur le canal

Courbe à "dénivelée normale"



Courbe de correction du débit



Annexe 2

Précipitations journalières à Batamani en mm

(année hydrologique 1998-99)

MOIS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE
1					9		
2							1
3			7		30		
4		0,5				10	
5			7	5	9		
6						3,5	
7				15		72	
8							
9			5,5				
10					4		
11					4	18	
12					23		
13							
14						16	
15				16			
16			5	1		1	
17							
18						4,5	
19							
20					2	14	
21	8			19			
22						17,5	
23						6	
24							
25	5,5					12	
26			0,5	5			
27			0,5				
28							
29			8				
30							
31					8,5		
Cumul	13,5	0,5	33,5	61	89,5	174,5	1

N. B. précipitations nulles de Novembre 98 à Mars 99

Annexe 3.1

Hauteurs d'eau moyennes journalières en 1998-99 (en cm)

Échelle du Mayo Ninga à Débaré

jour	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dec	Janv	Fevr	Mars	Avri
1	-	-	-	-	584	643	673	589	-	319	272	-
2	-	-	-	-	587	644	673	582	-	316	277	-
3	-	-	-	-	589	645	673	573	-	312	277	-
4	-	-	-	-	591	647	673	565	-	309	276	-
5	-	-	-	-	594	648	673	557	-	307	278	-
6	-	-	-	-	596	-	672	551	-	310	277	-
7	-	-	-	-	603	-	671	545	-	-	275	-
8	-	-	-	-	604	-	670	538	-	-	272	-
9	-	-	-	446	608	-	669	534	-	307	267	-
10	-	-	-	452	610	-	669	529	-	305	260	-
11	-	-	-	459	611	-	667	523	-	303	253	-
12	-	-	-	469	614	-	666	518	-	302	-	-
13	-	-	-	487	618	-	664	513	-	301	-	-
14	-	-	-	501	621	-	662	508	-	300	-	-
15	-	-	-	504	622	-	661	502	-	298	-	-
16	-	-	-	508	624	-	658	-	-	297	-	-
17	-	-	-	513	625	-	656	-	-	297	-	-
18	258	-	-	518	626	-	654	-	-	295	-	-
19	-	-	-	524	628	-	651	-	-	293	-	-
20	-	-	-	532	-	-	649	-	-	291	-	-
21	-	-	-	541	-	-	646	-	-	285	-	-
22	-	-	-	549	-	-	643	-	-	279	-	-
23	-	-	-	553	-	-	640	-	-	-	-	-
24	-	-	-	557	-	669	636	-	-	-	-	-
25	-	-	-	561	638	669	632	-	-	-	-	-
26	-	-	-	566	639	670	628	-	-	267	-	-
27	-	-	-	570	640	671	623	-	-	-	-	-
28	-	-	-	573	641	671	618	-	-	-	-	-
29	-	-	-	577	642	672	611	-	335	-	-	-
30	-	-	-	580	643	673	597	-	330	-	-	-
31	-	-	-	582	-	673	-	-	324	-	-	-

Annexe 3.2

Hauteurs d'eau moyennes journalières en 1998-99 (en cm)

Échelle de la mare de Batamani

jour	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dece	Janv	Fevr	Mars	Avri
1	-	-	-	-	281	344	369	301	-	169	129	-
2	-	-	-	-	283	344	369	297	-	167	128	-
3	-	-	-	-	286	345	369	294	-	164	127	-
4	-	-	-	-	288	347	369	291	-	162	126	-
5	-	-	-	-	290	-	368	288	-	160	126	-
6	-	-	-	-	292	-	367	285	-	159	124	-
7	-	-	-	-	300	-	-	283	-	-	123	-
8	-	-	-	-	301	-	-	281	-	-	122	-
9	-	-	-	40	304	-	365	279	-	154	121	-
10	-	-	-	48	307	-	364	-	-	153	121	-
11	-	-	-	55	309	-	363	-	-	151	120	-
12	-	-	-	65	312	-	361	274	-	150	-	-
13	-	-	-	85	315	-	359	273	-	148	-	-
14	-	-	-	118	319	-	358	272	-	147	-	-
15	-	-	-	143	322	-	356	270	-	146	-	-
16	-	-	-	151	324	-	354	-	-	145	-	-
17	-	-	-	160	325	-	351	-	-	144	-	-
18	72	-	-	170	326	-	349	-	-	142	-	-
19	-	-	-	178	328	-	346	-	-	141	-	-
20	-	-	-	187	-	-	343	-	-	140	-	-
21	-	-	-	197	-	-	340	-	-	139	-	-
22	-	-	-	208	-	-	337	-	-	137	-	-
23	-	-	-	225	-	-	333	-	-	-	-	-
24	-	-	-	240	-	366	329	-	-	-	-	-
25	-	-	-	252	338	367	326	-	-	-	-	-
26	-	-	-	259	339	368	322	-	-	133	-	-
27	-	-	-	265	340	368	318	-	-	-	-	-
28	-	-	-	269	341	368	314	-	-	-	-	-
29	-	-	-	273	342	369	309	-	176	-	-	-
30	-	-	-	276	343	369	305	-	174	-	-	-
31	-	-	-	278	-	369	-	-	171	-	-	-

Annexe 3.3

Débits moyens journaliers dans le canal en 1998-99 (en l/s)

jour	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dece	Janv	Fevr	Mars	Avri
1	0	0	0	0	2880	?	?	-1620	-611	-120	-9,1	0
2	0	0	0	0	3210	?	?	-956	-587	-99,0	-10,4	0
3	0	0	0	0	3490	?	?	-865	-563	-111	-11,4	0
4	0	0	0	0	3530	?	?	-834	-540	-127	-6,0	0
5	0	0	0	0	3470	?	?	-1100	-519	-124	-4,6	0
6	0	0	0	0	2880	?	?	-1260	-498	-117	-4,6	0
7	0	0	0	9,0	2920	?	?	-1270	-478	-99,6	-2,2	0
8	0	0	0	71,9	3670	?	?	-1270	-459	-65,8	0	0
9	0	0	0	173	4540	?	?	-1250	-440	-56,3	0	0
10	0	0	0	241	3840	?	?	-1220	-422	-68,7	0	0
11	0	0	0	268	3240	?	?	-1190	-406	-61,1	0	0
12	0	0	0	399	2860	?	?	-1160	-389	-50,5	0	0
13	0	0	0	1380	3140	?	?	-1140	-374	-55,7	0	0
14	0	0	0	2170	2280	?	?	-1120	-358	-61,3	0	0
15	0	0	0	1980	1620	?	?	-1100	-344	-65,8	0	0
16	0	0	0	933	1320	?	?	-1080	-330	-57,2	0	0
17	0	0	0	1480	993	?	?	-1060	-317	-39,7	0	0
18	0	0	0	1770	598	?	?	-1040	-304	-24,6	0	0
19	0	0	0	1920	199	?	-2850	-1020	-292	-16,4	0	0
20	0	0	0	2330	?	?	-2760	-1000	-278	-12,4	0	0
21	0	0	0	2700	?	?	-2670	-960	-264	-12,1	0	0
22	0	0	0	4280	?	?	-2590	-921	-250	-13,5	0	0
23	0	0	0	5520	?	?	-2490	-884	-238	-8,6	0	0
24	0	0	0	4800	?	?	-2390	-849	-226	-7,8	0	0
25	0	0	0	3860	?	?	-2280	-814	-215	-6,9	0	0
26	0	0	0	3670	?	?	-2180	-782	-204	-9,3	0	0
27	0	0	0	3070	?	?	-2080	-750	-194	-13,0	0	0
28	0	0	0	2850	?	?	-1980	-720	-184	-9,4	0	0
29	0	0	0	3160	?	?	-1880	-691	-170		0	0
30	0	0	0	3330	?	?	-1780	-663	-119		0	0
31	0		0	3040		?		-637	-134		0	
Moy.	0	0	0	1790	-	-	-	-1010	-345	-54	-1,56	0

Q > 0 : écoulement E→O (remplissage)

Q < 0 : écoulement O→E (vidange)

? : débit impossible à déterminer (écoulement O→E non canalisé)