

Hydrologie d'une cuvette du lit majeur du Sénégal : exemple de la cuvette de Nianga

□ □ □

L. Séguis.

Hydrologue, ORSTOM, BP 1386, Dakar

Dans les années 1890, les premières observations limnimétriques journalières fiables sur le fleuve Sénégal ont débuté à Bakel (archivage à la brigade hydrologique de St. Louis). Effectuées d'abord durant le passage de la crue, elles sont devenues régulières au long de l'année et se sont étendues aux principales villes de la vallée. Un siècle s'est écoulé et nous disposons aujourd'hui de 600 stations-années environ. L'analyse de ces données a débouché sur un ouvrage de synthèse, la monographie du Sénégal (Rochette, 1974) décrivant le régime naturel du fleuve. Durant les vingt dernières années, le fleuve a été aménagé et son régime régularisé par la construction du barrage réservoir de Manantali (1987) et du barrage anti-sel de Diama (1986). Dernièrement, une digue a été érigée sur la rive droite de la retenue de Diama pour rehausser le plan d'eau (1992). Les techniciens de l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) définissent les scénarios de fonctionnement de ces ouvrages au moyen de logiciels de simulation et de gestion opérationnelle (Albergel *et al.*, 1993). Ces outils déterminent principalement la propagation de la crue dans le lit mineur. La complexité des phénomènes de débordement associée à la quasi-absence de données hydrologiques et topographiques a retardé les études dans le lit majeur. A la demande de l'OMVS, la SOGREAH (1970) réalisa un modèle maillé de la vallée. Les mailles étaient découpées selon les Unités Naturelles d'Equipements définies par Chaumeny (1973) à partir de la topographie. Le calage et la validité du modèle ne s'effectuaient qu'aux seules stations limnimétriques du lit mineur. Fautes de données hydrométriques et topographiques précises, ce modèle fonctionnait de manière globale et ne permettait pas de rendre compte du comportement réel d'une cuvette du lit majeur. Or, l'aménageur d'un périmètre irrigué travaille à cette échelle et non à celle de la vallée. Ses interrogations portent d'abord sur les volumes d'eau disponibles, les cotes des plans d'eau au long de l'année, pour calibrer et protéger les ouvrages puis optimiser la gestion des pompes. Parallèlement, il se soucie de la qualité de l'eau d'irrigation. De la qualité des colatures dépend aussi l'aménagement de nouveaux terrains.

Dans ce contexte, notre thème de travail a été la définition d'une méthode d'étude du comportement hydrologique des cuvettes du lit majeur du Sénégal. Cette méthode doit être facile à mettre en oeuvre, rapide et peu coûteuse pour répondre aux souhaits des aménageurs. Le terrain de la cuvette de Nianga nous a servi de laboratoire pour sa mise au point. Nous présenterons successivement :

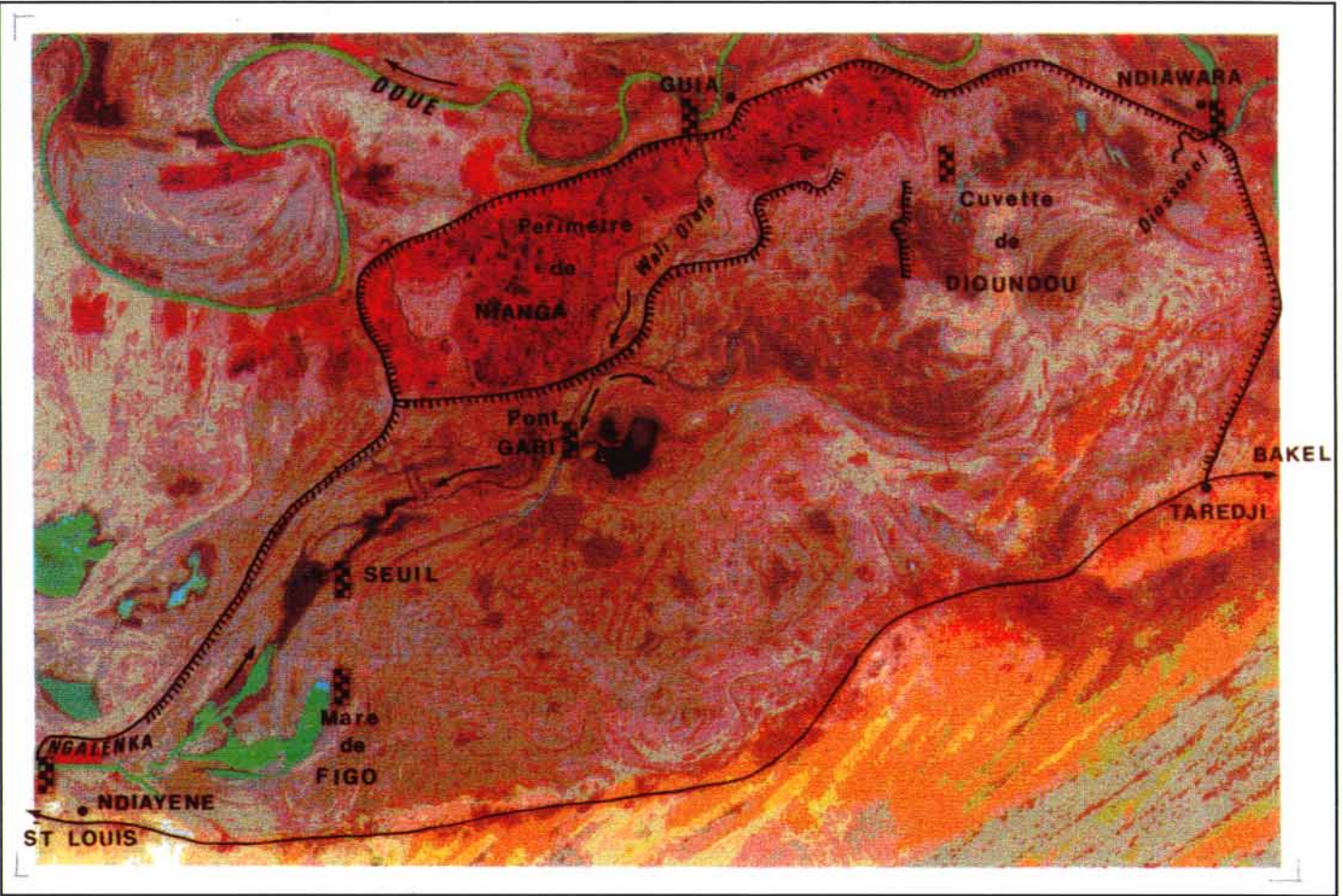
- l'apport de la télédétection dans l'actualisation des données cartographiques,
- les relations limnimétriques entre les stations de longue durée du lit mineur et les sites de diffuence vers la cuvette, qui permettent les simulations ultérieures,
- la détermination des courbes de remplissage et de vidange de la cuvette,
- leur utilisation en simulation en fonction des scénarios de gestion des barrages de Manantali et Diama.

Puis dans une dernière partie, nous traiterons des interactions entre les zones aménagées et naturelles de la cuvette à travers le devenir des eaux de drainage du périmètre irrigué de Nianga.

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION DANS L'ACTUALISATION DES DONNÉES CARTOGRAPHIQUES

La carte de la vallée au 1 : 50.000 commandée par la Mission d'Aménagement du Sénégal en 1959, est toujours d'actualité dans les zones non aménagées. L'équidistance des courbes est de 1 m avec des intercalaires à 0,50m. Cette carte sert à la délimitation des principales cuvettes d'inondation appelées "Unités Naturelles d'Equipement" par Chaumeny (1973), et à leur caractérisation hypsométrique. Des cartes à des échelles plus fines ont été établies notamment pour la cuvette de Nianga. Mais dans le contexte actuel de crues faibles, elles ne permettent pas de déterminer précisément la part de l'ancien réseau hydrographique dans le fonctionnement d'aujourd'hui. Du fait de la micro-rugosité des zones d'inondation, l'extrême précision altimétrique que nécessiterait la détermination des surfaces inondées en fonction de la cote du fleuve est inaccessible.

Une image satellitaire (par exemple, SPOT multispectrale, résolution 20 m) prise au moment de la crue permet de tracer le réseau hydrographique et des zones inondées. En effet, la faible pluviométrie dans la région de Podor (moyenne annuelle 1950-1980 : 288 mm) limite le couvert végétal. Le gradient radiométrique entre les surfaces exondées et en eau est d'autant plus marqué. La délimitation des zones inondées est donc très précise. Le 3 septembre 1991, une image SPOT centrée sur la cuvette de Nianga a été prise. Simultanément, à l'aide d'un système de positionnement par satellite (GPS) dont la précision est de l'ordre de 30 m, nous repérons sur le terrain les limi-



Composition colorée (cuvette de Nianga (3 octobre 1991)) :
 les eaux de drainage du périmètre (rouge) apparaissent foncées
 et se distinguent de celles de la crue, turquoise.

(Echelle approximative 1 : 65 250)

tes des surfaces inondées. On constate sur la figure 1 que les cercles, symboles des points d'observations de terrain, interceptent pratiquement toutes les surfaces en eau.

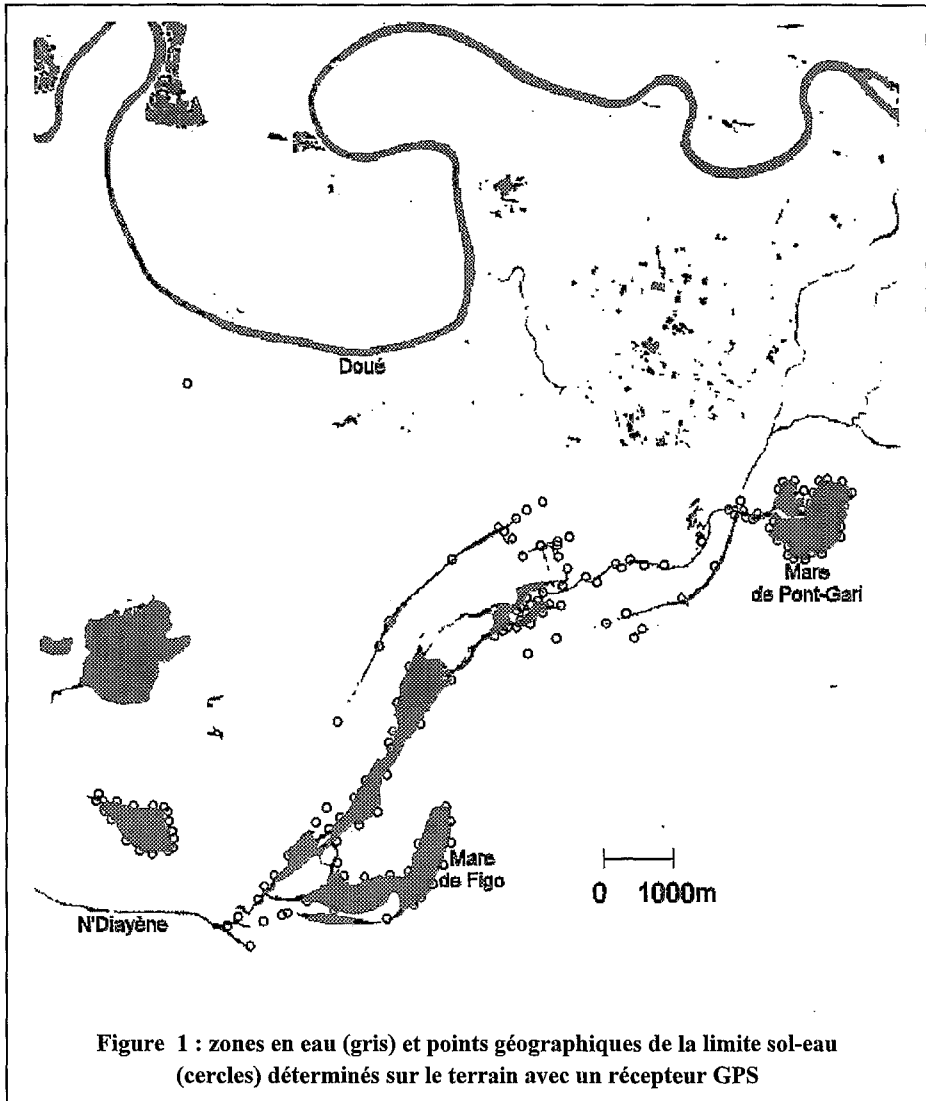


Figure 1 : zones en eau (gris) et points géographiques de la limite sol-eau (cercles) déterminés sur le terrain avec un récepteur GPS

Cette vérification établie, la composition colorée (Cf. planche hors-texte) nous sert d'illustration à la description du réseau hydrographique de la cuvette. La cuvette de forme ovale a une superficie de 200 km² environ, elle est bordée au sud par la route nationale reliant St. Louis à Bakel le long des dunes du *jeeri*, et par une digue la protégeant du Doué sur les autres côtés. Sa partie nord est

occupée par le périmètre rizicole de Nianga, lui-même séparé par une digue de la zone non encore aménagée. Les voies naturelles d'entrée d'eau dans la cuvette sont au nombre de deux : le pont-vanne de Ndiayène sur le Ngalanka au sud-est et deux buses munies de vannes sur le Diossorol, petit affluent du Doué à hauteur du village de Ndiawara à l'est de la cuvette. A proximité de Guia, une station de pompage sur le Doué alimente le périmètre. Les colatures du périmètre rejoignent le Wali Diala, ancien effluent du Doué, et maintenant drain principal du périmètre. Les eaux quittent gravitairement le périmètre par un ouvrage muni d'une vanne à clapet à proximité de Pont Gari. Elles s'écoulent alors vers l'est ou le sud à la rencontre des eaux provenant du Ngalanka. Sur la composition colorée, on discrimine facilement les eaux de drainage du périmètre, qui, moins turbides que les eaux de crue, absorbent plus la lumière. Dans la partie Est de la cuvette, une digue d'orientation nord-sud a été construite. Elle ferme la petite cuvette de Dioundou alimentée par le Diossorol. Cette digue, retenant l'eau, permet l'inondation de plus grandes surfaces pour les cultures de décrue. Un pertuis muni d'une vanne permet la vidange de cette cuvette vers l'ouest.

Un traitement numérique simple (Cf. composition colorée) a permis de dégager le réseau hydrographique fonctionnel et de déterminer la zone de contact des eaux provenant du périmètre de celles de la crue. Il ouvre la voie aux mesures sur le terrain.

RELATION ENTRE LES SITES DE DIFFLUENCE ET LES STATIONS LIMNIMÉTRIQUES DE LONGUE DURÉE DU LIT MINEUR

Deux échelles limnimétriques ont été installées sur les sites d'entrée d'eau dans la cuvette à Ndiayène et à Ndiawara (Figure 2).

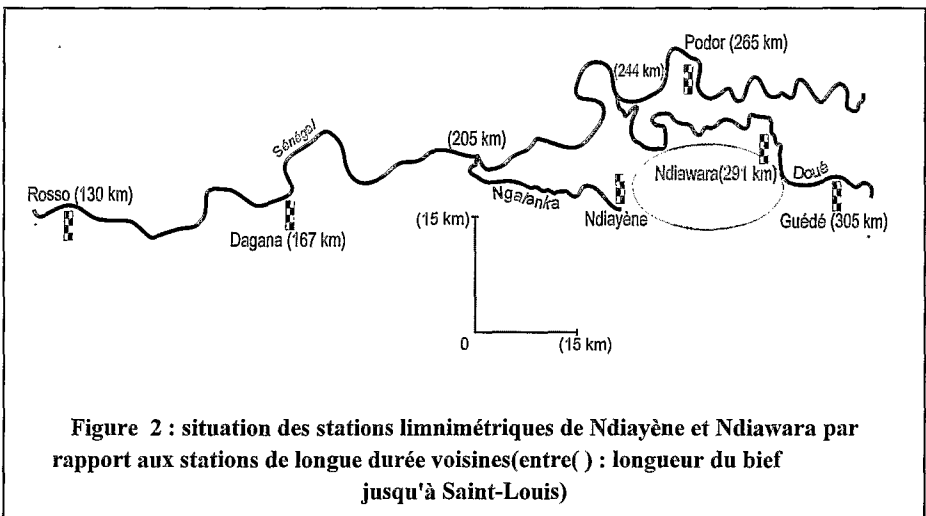
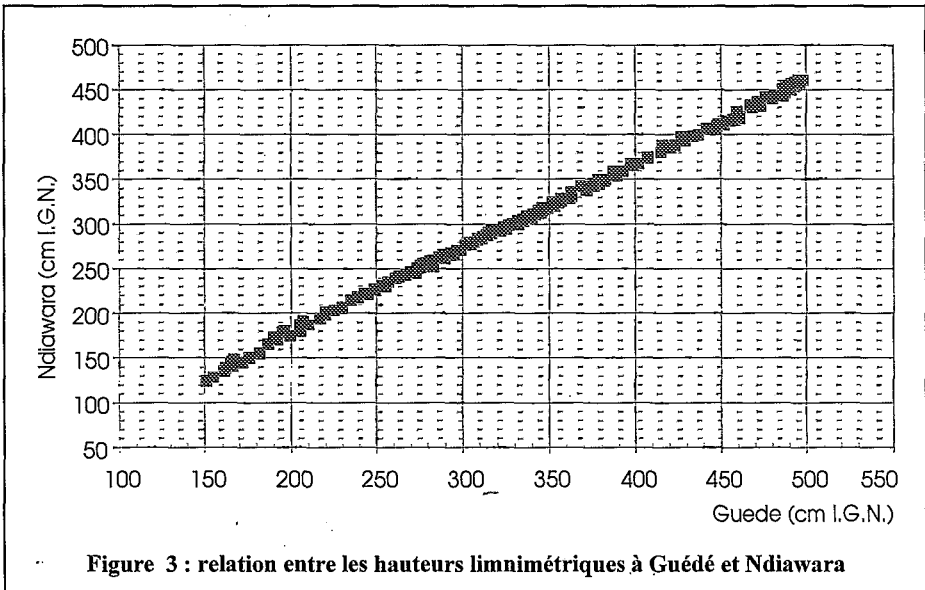


Figure 2 : situation des stations limnimétriques de Ndiayène et Ndiawara par rapport aux stations de longue durée voisines(entre () : longueur du bief jusqu'à Saint-Louis)

Guédé, station suivie depuis 1940 sur le Doué, est située à 14 km à l'amont de Ndiawara. La corrélation entre les hauteurs en centimètre IGN de Guédé et celles de Ndiawara est la suivante :

$$H_{\text{Ndiawara}} = 0,942 H_{\text{Guédé}} - 9,89 \quad (r^2=0,99) \quad (1)$$

Pour une hauteur de 400 cm IGN à Guédé, la dénivelée est de 33 cm (Figure 3). En première approximation, nous considérons qu'en crue, la pente de la ligne d'eau doit être peu influencée par le niveau dans la retenue de Diama du fait de son éloignement.

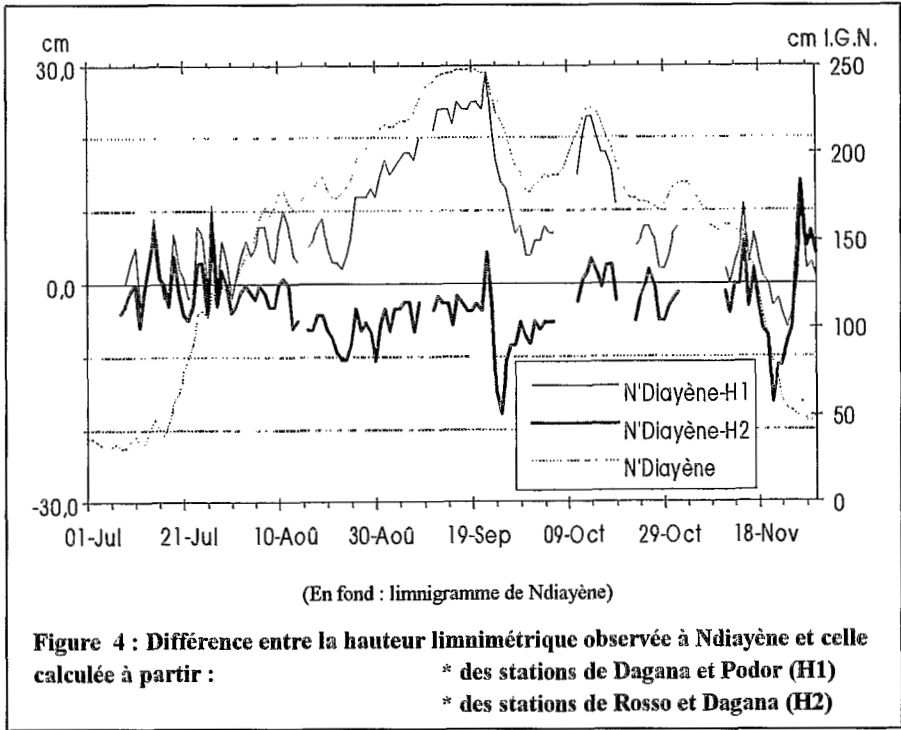


Sous l'hypothèse que le Ngalanka ne présente pas de seuil, le niveau d'eau à Ndiayène, lorsque le pont-vanne est fermé, est égal au niveau d'eau à l'effluence du Ngalanka. La hauteur à l'effluence peut se calculer linéairement par interpolation entre Dagana et Podor ou par extrapolation de la ligne d'eau Rosso-Dagana. Dans le premier cas, les hauteurs calculées sont surestimées en crue, alors que dans le second cas, il y a adéquation (figure 4). On peut en conclure que la ligne d'eau n'est pas linéaire entre Podor et Dagana, probablement du fait de la confluence du Sénégal et du Doué.

La hauteur à Ndiayène se déduit donc de celles de Dagana et Rosso par la formule :

$$H_{\text{Ndiayène}} = H_{\text{Dagana}} + 1,027 \times (H_{\text{Dagana}} - H_{\text{Rosso}})$$

Disposant des chroniques de longue durée aux stations principales du lit mineur, nous pourrions déduire les hauteurs aux sites d'entrée d'eau dans la cuvette.



DÉTERMINATION D'UNE COURBE DE REMPLISSAGE D'UNE CUVETTE

L'étape suivante dans la connaissance d'une cuvette passe par la détermination de sa courbe de remplissage. L'équidistance des courbes altimétriques donnée par les cartes disponibles dans la vallée est insuffisante pour rendre compte des micro-reliefs et un nouveau relevé topographique précis est difficile à mettre en oeuvre et souvent très onéreux. L'importance de micro-seuils, pour de petites retenues, est telle qu'il est nécessaire de pouvoir distinguer une courbe de remplissage d'une courbe de vidange. Cette distinction n'est pas possible précisément à partir de l'interprétation d'images aériennes ou satellitaires. La simple connaissance des flux entrant et sortant du réservoir permet de lever cet obstacle.

Méthode

Connaissant les volumes entrant et sortant de la dépression ainsi que les variations du niveau du plan d'eau, on peut déterminer la courbe de remplissage en appliquant l'équation de continuité, qui traduit le principe de conservation des volumes.

Entre deux instants t_1 et t_2 , l'équation de continuité appliquée à la dépression s'écrit :

$$W_2 - W_1 = [(Q_{e1} + Q_{e2})/2 - (Q_{s1} + Q_{s2})/2] * (t_2 - t_1) + [P - E * (t_2 - t_1)] * A + K * P * (S - A) \quad (2)$$

avec

$W_2 - W_1$: variation du stock d'eau entre t_1 et t_2	$[L^3]$
Q_{e1} et Q_{e2}	: débits entrants aux instants t_1 et t_2	$[L^3.T^{-1}]$
$Q_{s1} + Q_{s2}$: débits sortants aux instants t_1 et t_2	$[L^3.T^{-1}]$
P	: précipitation entre t_1 et t_2	$[L]$
E	: pertes (évaporation, infiltration) par unité de surface et de temps	$[L.T^{-1}]$
A	: surface inondée,	$[L^2]$
K	: coefficient de ruissellement,	
S	: surface du bassin	$[L^2]$

Soit :

$h_2 - h_1$: variation de la hauteur au centre de la cuvette entre t_1 et t_2

Si l'on suppose que pour de très petites variations de hauteurs, la surface reste constante,

$$W_2 - W_1 = A * (h_2 - h_1) \quad (3)$$

Par égalité de (2) et (3),

$$A = \{ [(Q_{e1} + Q_{e2})/2 - (Q_{s1} + Q_{s2})/2] * (t_2 - t_1) \} / [(h_2 - h_1) + E * (t_2 - t_1) - P + KP] \quad (4)$$

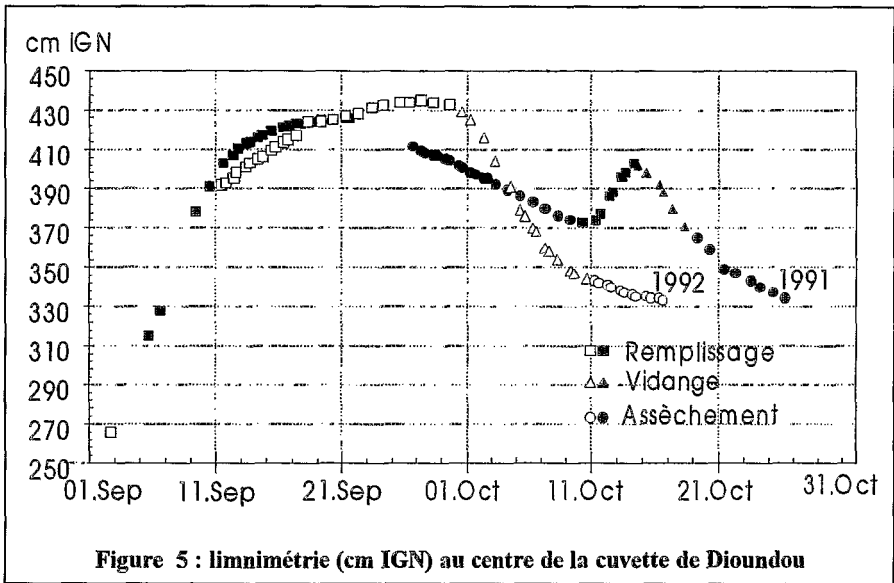
Pour l'application de la méthode, les données à acquérir sont donc :

- les divers flux d'eau à travers la dépression :
- les précipitations sur le plan d'eau,
- les débits entrant et sortant mesurés,
- les pertes globales par évapotranspiration et infiltration estimées par la baisse du plan d'eau en période de fermeture de la retenue.
- les variations altimétriques du plan d'eau.

Pour déterminer précisément les débits entrant et sortant du réservoir, nous recommandons d'effectuer des jaugeages plutôt que d'appliquer une formule d'hydraulique dont les conditions d'utilisation sont difficiles à cerner et à respecter. Enfin, la méthode ne s'applique qu'à de petits réservoirs pour lesquels le niveau du plan d'eau peut être assimilé à un plan horizontal facilement contrôlable par un seul limnimètre.

Application à la cuvette de Dioundou

En 1991 et 1992, la dépression de Dioundou (Cf. carte hors-texte) à l'est de la cuvette a fait l'objet d'un suivi hydrologique. Elle est limitée à l'aval par une petite digue munie d'une vanne à crémaillère obturant une buse en béton. Cette digue a pour fonction de rehausser le niveau d'eau à l'amont. Sa vanne est ouverte à la décrue afin d'inonder les terrains plus en aval. Le limnigramme obtenu en 1991 (Figure 5) au centre de la dépression montre deux phases de remplissage séparées par une période de vidange par évapotranspiration et infiltration. En 1992, la crue monomodale entraîne un seul remplissage. La vidange se fait par ouverture de la vanne aval.



Les volumes entrant dans la dépression sont mesurés à l'aval des buses munies d'une vanne de Ndiawara. 61 jaugeages sont effectués en 1991, 66 en 1992. Le volume total écoulé est de 1,291 millions de m³ en 1992 contre 1,544 en 1991. Les précipitations moyennes sur la dépression sont de 133 mm en 1991 et 142 mm en 1992. Les volumes sortant de la dépression à travers la buse en charge se calculent par une formule d'hydraulique vérifiée par jaugeage.

L'équation de continuité s'applique entre deux jaugeages consécutifs. L'intervalle de temps atteignant parfois 12 heures ne permet pas de négliger les pertes. Celles-ci (évapotranspiration et infiltration confondues) sont estimées à 3 cm par jour d'après la phase de tarissement observée en 1991.

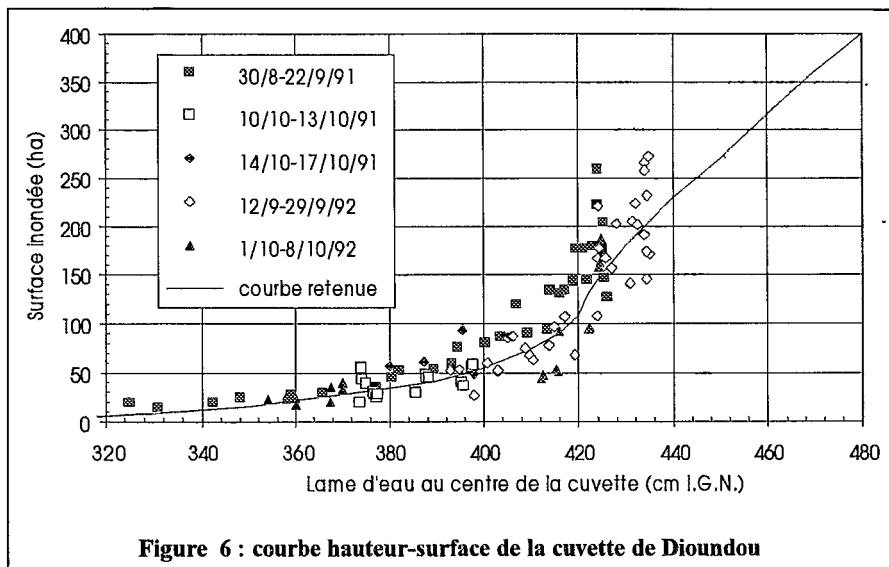


Figure 6 : courbe hauteur-surface de la cuvette de Dioundou

Hauteur (cm IGN)	Surface (ha)
240	0
300	2
340	12
350	15
360	22
370	28
380	35
390	42
400	55
410	74
416	90
420	108
422	130
424	145
430	180
440	230
450	270
460	315
470	360
480	400

Tableau 1 : courbe de remplissage de la cuvette de Dioundou

La figure 6 regroupe les courbes obtenues à partir des différentes phases de remplissage et vidange. Les surfaces inondées déterminées lors du premier remplissage en 1991 (30/8 - 22/9/91) paraissent surestimées. Par contre, les nuages de points des deux autres phases de remplissage se correspondent. Du fait de la présence de seuils, les volumes disponibles à la vidange sont inférieurs aux volumes stockés lors du remplissage.

Bien qu'il semble envisageable de distinguer une courbe de remplissage et une de vidange, nous avons préféré ne retenir qu'une courbe étant donné la dispersion. Cette courbe a été extrapolée jusqu'au point de coordonnées (4,80 m ; 400 ha), déterminé par planimétrie des courbes de niveau de la carte au 1 : 50.000 (Tableau 1).

La méthode a pu être validée sur l'image SPOT du 3 octobre 1991. L'étude des comptes numériques dans le canal 3 ($790-890 \times 10^{-9}$ m, proche infra-rouge) montre que les surfaces en eau correspondent aux pixels de compte numérique inférieur à 96. Dans la zone de la cuvette de Dioundou, 1380 pixels (20 m de côté) répondent à ce critère. Ce qui représente une surface en eau de 55 ha (Séguis et Dubée, 1992). D'après la courbe hau-

teur-surface retenue de la figure 5, le plan d'eau à une altitude de 4,03 m IGN le 3 octobre, ennoyait une surface de 61 ha. Il aurait été intéressant de valider la partie supérieure de la courbe par une autre image mais au coût financier de la vue s'ajoutent les contraintes techniques de programmation du satellite : la période de scrutation est au minimum d'une semaine et doit être fixée au moins 21 jours à l'avance.

SIMULATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UNE CUVETTE, EXEMPLE DE LA CUVETTE DE DIOUNDOU

L'objectif est de déterminer les fluctuations du plan d'eau connaissant les hauteurs du fleuve au droit de la prise du Diossorol et les précipitations sur la dépression. Au pas de temps journalier, les différentes étapes du calcul sont successivement :

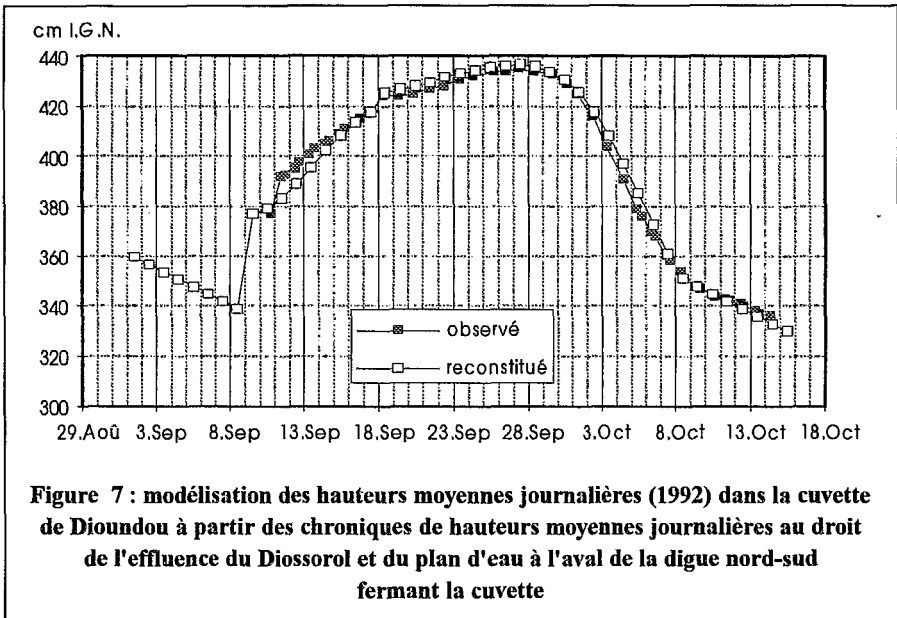
- a) Calcul du volume apporté par précipitation, directement sur le plan d'eau ou indirectement par ruissellement sur son bassin versant. On suppose qu'il y a un ruissellement généralisé susceptible d'atteindre le plan d'eau lorsque la précipitation dépasse 10 mm. La valeur du coefficient de ruissellement déterminée sur les années 1991-92 est égale à 6,5% (Séguis, 1994).
- b) Calcul de la cote de l'eau dans la cuvette suite à l'éventuel apport par précipitation.
- c) Soustraction des pertes par évaporation et infiltration. Le lendemain d'un jour pluvieux, on limite les pertes à l'infiltration (2cm/jour) (Séguis, 1994).
- d) Calcul de la cote dans la cuvette en fonction des volumes entrant par le Diossorol à Ndiawara et sortant par la vanne de la digue nord-sud. Le volume entré se déduit du débit moyen à Ndiawara Q_e , entre les jours (j-1) et j.

$$Q_e = (Q_{e(j-1)} + Q_{e(j)}) / 2$$

Le débit entrant le jour (j) est inconnu car il fait intervenir la hauteur du plan d'eau le jour (j) qui est à déterminer. Il est calculé par itérations.

Tout en sachant que les deux années de mesure ont servi à établir la courbe de remplissage de la cuvette et que par conséquent nous nous exposons à la critique d'avoir choisi comme période de validation la période de calibration, nous présentons dans la figure 7 les hauteurs journalières dans la cuvette reconstituées selon l'algorithme précédent.

Le modèle mis au point permet donc de simuler le remplissage de la cuvette à partir de la chronique de précipitation journalière à Podor et de la chronique de cotes journalières à la station de Guédé. Les cotes au droit de l'effluence du Diossorol sur le Doué sont déduites des cotes à Guédé par la relation (1).



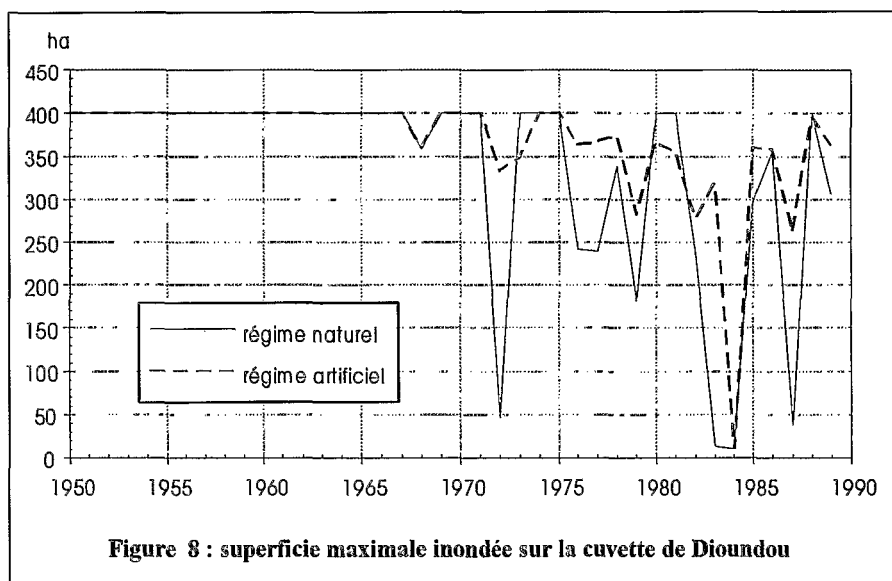
Au moyen des logiciels SIMULSEN (Bader, 1991) et COREDIAM (Bader, 1992), nous avons reconstitué une chronique journalière de hauteurs au droit de l'effluence, sur la période 1950-1989 pour des scénarios de gestion moyens des deux barrages (Manantali et Diama). Les règles de gestion retenues dans ce calcul pour le barrage réservoir de Manantali, sont par ordre de priorité décroissante :

- le laminage des crues du Bafing à $1.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la sortie du barrage et du Sénégal à $4.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au niveau de Bakel,
- la satisfaction des besoins en eau pour la culture irriguée de 100 000 hectares dans la vallée,
- la satisfaction d'une demande de production électrique pour une puissance constante demandée de 80 mégawatts
- le soutien d'une crue artificielle d'un débit maximum de $2.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pendant 6 jours à Bakel, à l'entrée de la moyenne vallée.

Au barrage de Diama, la cote est supposée maintenue constante à 1,50 m IGN.

Pour simuler le remplissage de la cuvette de Dioundou, la courbe d'étalonnage de l'effluence a été extrapolée. La limite supérieure de la courbe de remplissage de la cuvette est fixée à 4,80 m IGN (soit 400 ha), altitude au-dessus de laquelle, la digue fermant la cuvette à l'aval serait submergée. Le pertuis de Ndiawara est considéré fermé si le niveau du Doué devient inférieur à celui du plan d'eau dans la cuvette. De la chronique simulée des superficies journalières inondées, les superficies maximales annuelles inondées ont été extraites.

La figure 8 présente les superficies maximales inondées de la cuvette entre 1950 et 1989 à partir de la chronique observée à Guédé (régime naturel) ou de celle déduite du scénario de gestion choisie (régime régularisé). On constate que la cuvette est remplie pratiquement chaque année jusqu'en 1970, que le régime soit naturel ou artificiel. Depuis 1970, la simulation montre que le régime artificiel permet un meilleur remplissage de la cuvette que le régime naturel.



Bien que le soutien d'une crue artificielle arrive en quatrième position dans le scénario de gestion retenu, la crue produite est suffisamment importante pour sécuriser le remplissage de la cuvette. De plus, à crue égale à Bakel, la cote au droit de l'effluence du Diossorol est rehaussée du fait de l'influence du niveau élevé de la retenue de Diama. Sans vouloir généraliser à l'ensemble de la vallée, les futures règles de gestion des deux barrages permettront de limiter le nombre d'années déficitaires.

UN CAS DE FIGURE D'INTERACTION ENTRE UN PÉRIMÈTRE IRRIGUÉ ET SON ENVIRONNEMENT NATUREL : LE SYSTÈME HYDROGRAPHIQUE WALI DIALA-NGALANKA

Le système hydrographique Wali Diala-Ngalanka dans la partie occidentale de la cuvette est plus complexe que celui du Diossorol (Cf. planche hors-texte). Les entrées d'eau sont doubles. Une vanne à clapet sur la digue sud du périmètre obture le Wali Diala et permet la vidange du périmètre dans le milieu naturel. Au sud, le Ngalanka est barré par le pont-vanne de Ndiayène. En 1991 et 1992, nous avons étalonné ces ouvrages dans la perspective

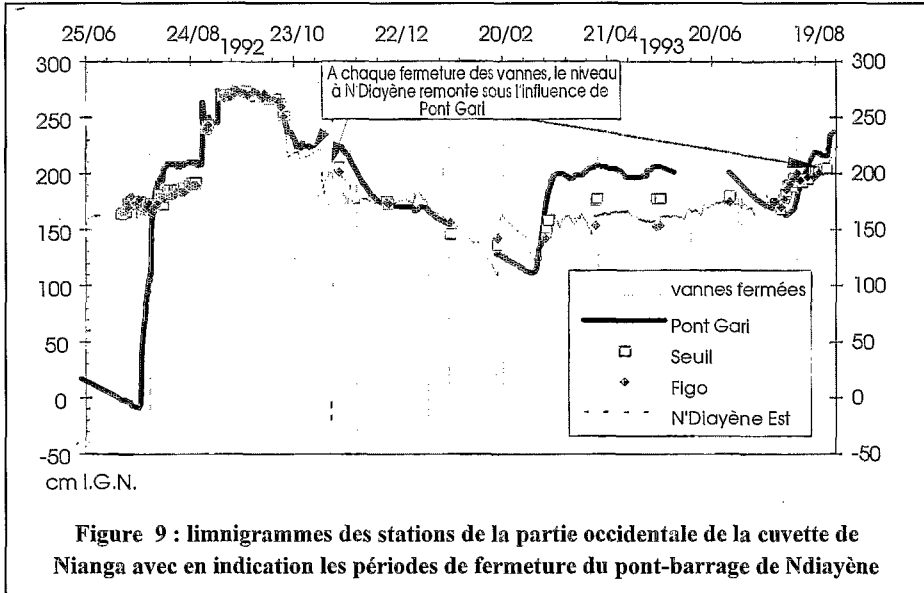
d'établir un modèle similaire à celui qu'on a appliqué à la cuvette de Dioundou. Des difficultés sont apparues dans l'interprétation des cotes limnimétriques des différentes stations (seuil, Pont Gari, Figo, Ndiayène). Toutes les échelles (*Cf.* planche hors-texte) ont été rattachées en 1992 à celle de Ndiayène par comparaison des hauteurs lues aux plus hautes eaux lorsque le niveau est étale. Le cubage des volumes d'eau entrés dans la cuvette à Ndiayène est quasiment impossible à évaluer en 1991 et 1992 car les vannes étaient manoeuvrées en fonction de multiples objectifs contradictoires : libre-passage des pirogues, rétention d'eau à l'intérieur de la cuvette pour permettre l'alimentation des motopompes sur radeau flottant, vidange de l'eau afin de cultiver en décrue *etc.* Une gestion plus rigoureuse des vannes (maintien d'un niveau élevé dans le Ngalanka à l'intérieur de la cuvette) nous a permis d'identifier la cote (déterminée à Pont Gari) de déversement du Wali Diala dans le Ngalanka.

Détermination du schéma de circulation des eaux

Le graphique 9 présente les limnigrammes des stations. Les fluctuations du Wali Diala à Pont-Gari correspondent aux phases de mise en eau du périmètre de Nianga, le 14 juillet 1992 pour l'hivernage, vers le 5 mars 1993 pour le riz de contre-saison et le 30 juillet pour l'hivernage 1993. On vérifie que les niveaux d'eau entre le Ngalanka à Ndiayène et le Wali Diala à Pont Gari sont égaux pour des hauteurs supérieures à 2,40 m IGN. Le seuil soupçonné en 1991 (Séguis et Dubée, 1992) doit être complètement noyé. Il doit se situer légèrement au nord de la station appelée "Seuil". Entre 2,45 et 1,80 m environ, lorsque que le niveau du Wali Diala à Pont Gari est supérieur à celui du Ngalanka à Ndiayène Est, il y a alimentation du Ngalanka par les colatures du périmètre. Ce soutien du Ngalanka a été observé sur les périodes suivantes :

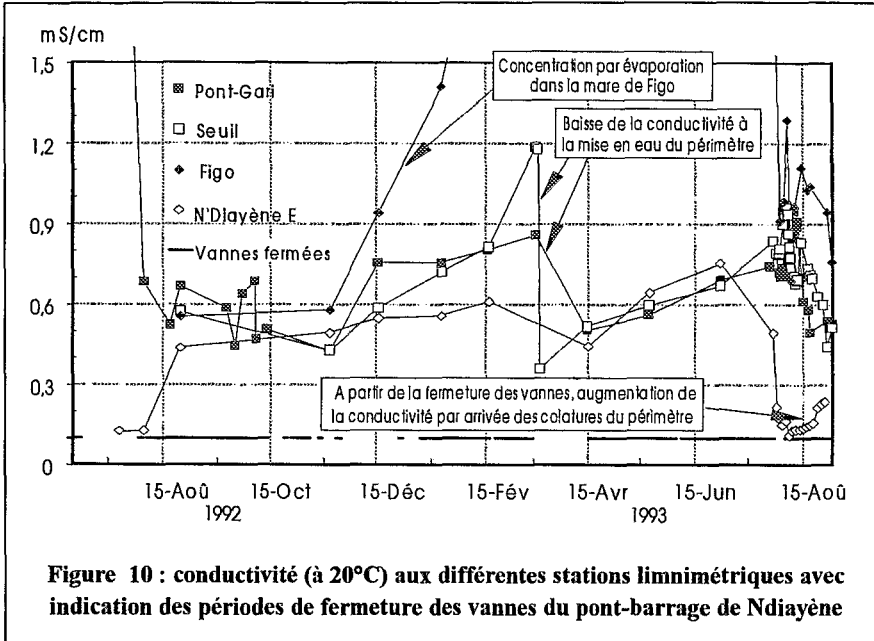
- Du 15 octobre au 20 novembre 1992, le niveau du Ngalanka à Ndiayène Ouest (côté extérieur à la cuvette) est inférieur au niveau de Ndiayène Est (intérieur cuvette). A chaque ouverture des vannes du pont barrage de Ndiayène, le niveau à Ndiayène Est s'abaisse brutalement. Dès que les vannes sont refermées, le niveau à Ndiayène Est remonte et tend à rejoindre celui de Pont Gari.
- Du 15 avril au 4 juin 1993, les vannes sont fermées et on n'observe pas de baisse de niveau à Ndiayène Est malgré une évaporation de l'ordre de 10 mm par jour. Il y a probablement un apport d'eau provenant du périmètre de Nianga. La cote de la station "seuil" intermédiaire entre celles de Pont Gari et Ndiayène confirme l'écoulement de Pont-Gari vers Ndiayène.
- A partir du 8 août 1993, les vannes sont fermées et le niveau du Ngalanka à Ndiayène Est monte jusqu'à la fin des observations, le 31 août.

La figure 9 permet aussi de vérifier que la mare de Figo est directement alimentée par le Ngalanka à Ndiayène, les niveaux étant toujours voisins pour des hauteurs supérieures à 1,70 m IGN.



La salinité des eaux de drainage circulant dans le Wali Diala est plus forte que celle des eaux du Ngalanka. Elle peut être utilisée comme traceur. La figure 10 présente l'évolution de la conductivité (mesurée en laboratoire après prélèvement) aux différentes stations.

A chaque période de fonctionnement du périmètre, le transfert des eaux de colatures vers Ndiayène est décelable dans les conductivités si les vannes sur le Ngalanka sont fermées. En même temps que la montée des eaux, on observe une augmentation de la conductivité (par exemple, du 15 avril au 4 juin 1993 et du 8 au 31 août 1993). Pendant les périodes d'arrêt du périmètre, les stocks d'eau piégés par les seuils diminuent par évaporation. Il y a augmentation des conductivités par concentration. En 1992, il n'y avait pas eu de cultures de saison sèche. L'évaporation détermine la diminution de la cote à Pont Gari jusqu'au 14 juillet 1992. La conductivité a atteint 4 mS/cm. Pendant l'arrêt du périmètre du 23 novembre 1992 au 14 mars 1993, la salinité augmente aux stations de Pont Gari et Seuil jusqu'à dépasser 1 mS/cm au Seuil. Dans les jours suivants, la mise en eau du périmètre provoque une dilution et la conductivité tombe à 0,36 mS/cm le 18 mars au Seuil. La mare de Figo a été coupée du Ngalanka pendant 7 mois environ (cote inférieure à 1,70 m), la conductivité par évaporation pratiquement totale de la mare a atteint 2 à 3 mS/cm.



Ces premiers résultats au demeurant très qualitatifs établis par une analyse fine des niveaux limnimétriques et des conductivités nous ont permis de situer les seuils et les règles des mouvements d'eau dans la partie occidentale de la cuvette. Ils nous ont amenés à quantifier la masse de sels exportée du périmètre soit à établir un bilan hydro-salin du périmètre en 1992 et 1993.

Bilan hydro-salin du périmètre de Nianga

Les volumes d'eau pompés à la station de Guia sont déterminés par la SAED (société d'aménagement, encadrant le périmètre). Les volumes des colatures du périmètre sont établis par jaugeage à l'ouvrage de vidange du périmètre au nord de Pont-Gari sur le Wali-Diala. Cet ouvrage est muni d'une vanne à crémaillère laissée en position haute et d'un clapet empêchant l'éventuelle arrivée d'eau dans le périmètre. Des prélèvements réguliers permettent la mesure des conductivités en laboratoire. La relation entre la minéralisation totale de l'eau et la conductivité a été établie pour une conductivité comprise entre 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1 mS/cm . Elle est la suivante :

$$\text{Salinité (mg/l)} = 531,76 * \text{Conductivité (mS/cm à 25 °C)} + 13,53$$

$$(r^2=0,83 ; 28 \text{ valeurs})$$

La conductivité du Doué durant l'hivernage est d'environ 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La figure 11 présente pour le début de la campagne d'hivernage 1993 l'hydrogramme de vidange et les conductivités afférentes. Les variations importantes des débits ne sont pas encore analysées vu l'actualité de ces données. On constate que,

quelles que soient ces fluctuations, la conductivité reste relativement constante autour de 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

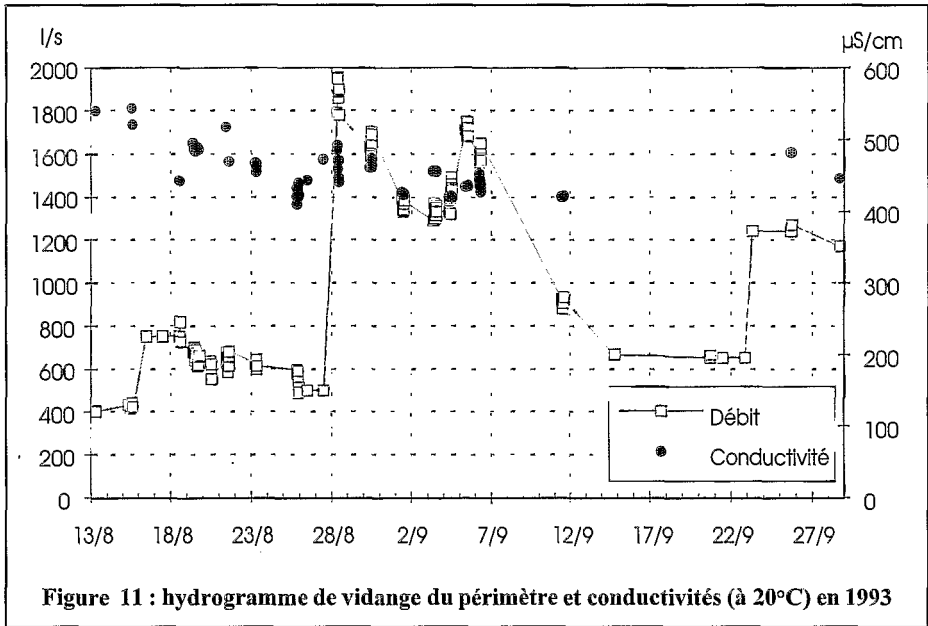


Figure 11 : hydrogramme de vidange du périmètre et conductivités (à 20°C) en 1993

Les termes des bilans sur les deux années sont donnés dans le tableau 2. Le bilan n'est établi que sur les périodes où les débits de vidange sont connus.

Période	Volume pompé (milliers de m ³)	Sels importés (tonnes)	Volume vidangé (milliers de m ³)	Sels exportés (tonnes)
11/8 au 31/08/1992	15184	690	5849	2227
19/9 au 19/11/1992				
13/8 au 28/09/1993	7348	334	3868	1086

Tableau 2 : bilan hydro-salin du périmètre de Nianga

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Le pompage moyen sur les deux années est d'environ $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour une vidange moyenne de $0,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La vidange constituée des trop-pleins des canaux d'irrigation, des colatures des parcelles et du drainage de la nappe, représente 50% des apports.
- La consommation en eau du périmètre pour une superficie d'environ 1.000 ha est de 9,5 mm/jour/ha.

- Le bilan salin du périmètre est négatif, -1537 t en 1992 et -752 t en 1993. Rapportée à une période de 90 j (durée d'un cycle rizicole) et à un hectare, la masse de sels extraite du périmètre est de 1,6 t/ha en 1992 et de 1,4 t/ha en 1993.

Ces données établies à l'échelle du périmètre sont à confronter avec les résultats préliminaires d'un bilan hydro-salin d'une parcelle rizicole de 1 ha (Salviagnol, 1993).

Les pertes dans la parcelle sont de 15 mm/jour dont 7 mm d'évapotranspiration réelle du riz. Ceci est conforme aux pertes évaluées à l'échelle du périmètre. L'infiltration ayant été déterminée nulle après les premiers jours de mise en eau, les pertes restantes (8 mm) doivent être localisées à la bordure de la parcelle longeant le drain.

La masse de sel exportée de la parcelle par les colatures au cours des vidanges successives d'un cycle rizicole serait de 221 kg/ha, chiffre très inférieur à celui calculé sur l'ensemble du périmètre. La salinité exportée du périmètre semble résulter d'un drainage des nappes salées (reliques des anciennes transgressions marines du quaternaire) et non d'un lessivage de la tranche de sol cultivé.

CONCLUSION

La première partie de cet article a montré les possibilités d'étude d'une zone du lit majeur encore soumise à l'inondation. Il est possible en quelques mois et à faible coût de déterminer le fonctionnement hydrologique d'une dépression. Le réseau hydrographique en activité est reconnaissable précisément par photo-interprétation d'images satellitaires (de résolution comparable à celle de SPOT, 20 m). Un important fond d'image existe maintenant sur la vallée, ce qui évite la programmation onéreuse d'un satellite. Les travaux de terrain consistent ensuite en une campagne débimétrique fonction de la durée du débordement du lit mineur (au plus, un mois). A la fin de la campagne, les termes du bilan hydrologique sont connus et permettent l'établissement de la courbe de remplissage. Divers scénarios de gestion peuvent être alors testés. Dans le cas spécifique de la cuvette de Dioundou, une gestion des barrages du fleuve Sénégal selon une hypothèse où la crue artificielle n'est pourtant pas l'objectif prioritaire permet cependant une alimentation assurée de la cuvette.

La seconde partie de l'article se focalise d'avantage sur les relations entre le milieu naturel et le milieu aménagé. L'étude fine de la conductivité et des niveaux limnimétriques dans la partie occidentale de la cuvette révèle la présence de seuils et le transfert des colatures du périmètre de Nianga vers le Ngalanka. La gestion actuelle du pont-barrage de Ndiayène, souhaitée par les détenteurs de petits périmètres vise à maintenir au plus haut la cote du Ngalanka à l'intérieur de la cuvette. Les eaux chargées s'accumulent dans les dépressions ou sont reprises pour l'irrigation. Le bilan hydro-salin du périmètre

montre que la moitié de l'eau pompée retourne au milieu naturel et que la salure acquise provient non pas des parcelles cultivées mais probablement des nappes originellement salées. Cet état de fait soulève les questions suivantes :

- Ne peut-on pas diminuer les volumes pompés sans pour autant porter préjudice au fonctionnement hydraulique des canaux d'irrigation ?
- Par l'achèvement de la digue mauritanienne, la retenue de Diama est maintenue pratiquement toute l'année au dessus de 1,50 m IGN Ne peut-on pas laisser le barrage de Ndiayène ouvert ?
- Enfin, après avoir recalibré le Wali Diala à l'amont de la station "Seuil", ne pourrait-on pas établir une circulation d'eau du Doué à Guia vers le Ngalanka en phase ascendante de la crue ? Cette chasse annuelle dessalerait le Wali Diala et le Ngalanka à l'amont de Ndiayène.

□ □ □

BIBLIOGRAPHIE

□ Albergel, J., Bader, J.-C., Lamagat, J. - P. et Séguis, L., 1993 : Crues et sécheresses sur un grand fleuve tropical de l'Ouest africain, application à la crue du fleuve Sénégal. *Sécheresse*, vol. 4, n°3, p 143-151.

□ Bader (J.-C.), 1991 : SIMULSEN : Logiciel de simulation de gestion de la retenue de Manantali au pas de temps journalier. *Notice d'utilisation ORSTOM, OMVS, Dakar*, 19 p. plus annexes.

□ Bader (J.-C.), 1992 : Calcul de la courbe de remous du barrage de Diama. Logiciel COREDIAM. *ORSTOM OMVS., Dakar*, 14 p. plus annexes.

□ Chaumeny, J., 1973 : Étude sur les unités naturelles d'équipement. *OMVS St. Louis, Sénégal*, 41 p.

□ Rochette, C., 1974 : Le bassin du fleuve Sénégal. *Monographies hydrologiques ORSTOM, édit. ORSTOM Paris*, 325 p. plus annexes.

□ Salvignol, C., 1993 : Gestion de l'eau en riziculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de bilan hydrique et salin. *Mémoire de fin d'études, École Supérieure d'Ingénieurs et de Techniciens pour l'Agriculture, France*, 34 p. plus annexes.

□ Séguis, L. et Dubée, G., 1992 : Cuvette de Nianga, hivernage 1991, rapport hydrologique. *ORSTOM Dakar*, 42 p. plus annexes.

□ Séguis, L., 1994 : Campagne hydrologique 1992 dans la cuvette de Nianga. *ORSTOM, Dakar*, à paraître.

□ SOGREA, 1970 : Modèle mathématique de la vallée du Sénégal. *Rapport sur le réglage du modèle Grenoble. France*, 94 p plus annexes.

□ □ □