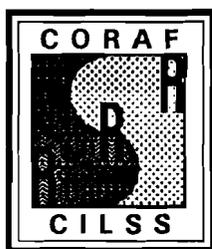


CRSTOM

I.E.R.



Programme CEE - CIRAD N° TS2A 0017 F CD

Projet Pilote " Mali-Sud "
Bas-fond de KAMBO
Rapport de synthèse :
HYDROLOGIE - HYDROGEOLOGIE

Jean ALBERGEL
Noël GUIGUEN
Patrick PARIENTE
Yannick PEPIN

DAKAR, Novembre 1991

Projet Pilote " Mali-Sud " Bas-fond de KAMBO
Rapport de synthèse : Volet HYDROLOGIE - HYDROGEOLOGIE

1. Objectifs, Méthodologie, Moyens

1.1 Objectifs de l'étude hydrologique

Le degré de mise en valeur des petits bas-fonds de la zone sub-soudanienne, où se trouve le projet pilote de KAMBO, est lié au degré de contrôle technique de l'eau. La connaissance du régime hydrologique d'un bas-fond permet de mettre en oeuvre des aménagements soit pour retarder la montée des eaux dans la cuvette, soit pour en retarder ou accélérer le retrait, soit pour étaler les eaux de crue sur une superficie plus grande à affecter aux cultures de décrues.

Le bas-fond de KAMBO, destiné traditionnellement à la riziculture, est équipé depuis début 88, d'un micro-barrage, type digue déversante avec barrière anti-drainage (barrage sous-terrain) et vannes métalliques pour contrôler le niveau d'eau.

L'objectif de cette étude vise à quantifier le bilan hydrologique d'un bas-fond jugé représentatif de la région sur des critères morphologiques, pédologiques et climatiques en vue d'une meilleure mise en valeur agricole. La mise en évidence des paramètres déterminants du processus hydraulique doit permettre un avis objectif sur l'efficacité de l'aménagement du bas-fond étudié et la mise au point d'un outil de diagnostic et d'aide à la décision pour l'aménagement des autres bas-fonds de la région.

1.2 Méthodes d'études mises en oeuvre à KAMBO

1.2.1 Le dispositif expérimental de KAMBO

Le dispositif expérimental installé à KAMBO est composé d'un réseau dense de mesure de la pluie dans le bas-fond et sur les versants, de deux stations hydrologiques équipées pour l'enregistrement des hauteurs d'eau et de sections de jaugeages aménagées, d'un réseau de mesure des fluctuations du niveau piézométrique de la nappe et d'un bac flottant pour la mesure de l'évaporation du plan d'eau. La carte 1 montre les équipements hydropluviométriques et la carte 2 les équipements piézométriques.

En 1990, le dispositif expérimental comprenait :

- 8 pluviomètres à lecture directe (modèle SPIE.A) avec bague réceptrice positionnée à un mètre au-dessus du sol
- 3 pluviographes «précis mécanique» dont deux modèles simplifiés
- 1 pluviographe OEDIPE (en double du P4) mis en service le 07/06/90
- 1 bac d'évaporation flottant avec son pluviomètre, installé dans la partie aval de la retenue
- 2 stations limnigraphiques (amont et barrage) composées de limnigraphes OTTX et de mires limnimétriques. L'installation particulière des gaines dans le sol permet de mesurer directement sur diagramme les variations de la nappe d'inféro-flux jusqu'à des cotes inférieures à 1.50 m du niveau du sol
- 36 tubes piézométriques crépinés dans leur partie inférieure sur 1,50 m, placés dans ou à proximité du bas-fond et descendus entre 2 et 4 m dans le sol
- 19 puits villageois situés sur les bords du bas-fond et sur les versants dont l'un, le P78, est équipé d'un limnigraphe
- des sections de jaugeages préparées avec notamment un petit déversoir à l'amont et un câble de repérage des verticales sur le seuil déversant du barrage.

Les protocoles de mesures ont été les suivants :

- pluviométrie : la pluie de la journée tombée avant 16h se relève le jour même: les pluies du soir et de la nuit se mesurent le matin
- pluviographie: les mesures de la pluie recueillie dans le seau se font de la même façon que pour le pluviomètre: les diagrammes sont changés après chaque pluie importante. La cartouche EPROM de l'OEDIPE est remplacée en fonction des vérifications de l'appareil.
- évaporation : un relevé est effectué tous les matins à 7h avec prise en compte de la pluie du jour mesurée au pluviomètre placé à proximité immédiate du bac (1.50 m)

- **limnigraphie** : pendant la saison des pluies, les rotations sont journalières (32h) et le changement de diagramme s'effectue à la fin de chaque crue importante. En saison sèche, les rotations sont hebdomadaires et les diagrammes remplacés tous les 15 jours
- **piézométrie** : une mesure est faite à la sonde électrique SEBA tous les 5 jours
- **jaugeage** : un hydrométriste est présent pendant tout l'hivernage et effectue des jaugeages à chaque crue et à toutes les variations significatives de cote.

1.2.2 Méthodes d'analyses et outils utilisés

Toutes les données recueillies sont critiquées et introduites dans une banque de données informatisée. On a utilisé les logiciels développés par le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM, HYDROM et PLUVIOM pour les données sur les eaux superficielles et le tableur LOTUS pour les données piézométriques. (Rapports de mission et de campagne, ALBERGEL, GUIGUEN, PARIENTE, PEPIN, 1988-90)

L'extrapolation des relations pluie - débit dans le temps a été réalisée à partir d'un modèle hydrologique conceptuel simple GR3 CEMAGREF de MICHEL & EDIJATNO (1989) fonctionnant au pas de temps journalier. Le fonctionnement de l'aménagement a été simulé sur une chronique de pluie (1963-1987) (PARIENTE, 1990). A partir de cette simulation, les stocks d'eau disponibles pour la riziculture ont été comparés aux besoins de la plante dans trois situations topographiques différentes du bassin. (PARIENTE, 1990). Les besoins en eau des cultures ont été exprimés à partir de la simulation du bilan hydrique (Modèle BIPODE de VAKSMAN, 1990).

La régionalisation des résultats s'est intéressée aux paramètres caractéristiques de la crue de projet et à ceux de l'écoulement annuel en utilisant tous les bassins observés dans la zone. Une synthèse entre le volet hydrologie et le volet télédétection devrait permettre un développement de ce thème dans la prolongation du programme.

1.2.3 Périodes d'observations, quantité et qualité des données

Le tableau 1.2.3.1 donne un aperçu de la nature, de la quantité et de la qualité des mesures réalisées.

Tableau 1.2.3.1 : Nature, quantité et qualité des observations hydrologiques

Rubrique	1988	1989	1990
Pluviométrie	3 pluviomètres 1 pluviographe	8 pluviomètres 3 pluviographes	8 pluviomètres 4 pluviographes
Quantité	74 jours de pluie	78 jours de pluie	87 jours de pluie
Qualité	année incomplète début le 9 juin	année complète	année complète
Limnigraphie	1 station	2 stations	2 stations
Quantité	enregistrement continu	enregistrement continu	enregistrement continu
Qualité	année incomplète	année complète	année complète
Piézométrie	15 piézomètres	36 piézomètres 19 puits villageois 2 piézographes	36 piézomètres 19 puits villageois 3 piézographes
Quantité	tous les 5 jours	tous les 5 jours	tous les 5 jours
Qualité	année incomplète	année complète	année complète
Evaporation			année complète 1 lecture/jour
Jaugeages station amont	19 jaugeages entre les cotes 0 et 78 cm, courbe d'étalonnage bi-univoque		
Jaugeages station aval	21 jaugeages 2 vannes en place, 66 jaugeages 1 vanne en place, 45 jaugeages 0 vanne en place - 3 courbes d'étalonnages bi-univoque		

1.3 Moyens mis en oeuvre

1.3.1 Moyens humains

Le volet hydrologique a été coordonné par J. ALBERGEL, hydrologue au centre ORSTOM de DAKAR. Le dispositif expérimental a été installé et suivi par N. GUIGUEN & Y. PEPIN, hydrologues du centre ORSTOM de BAMAKO. Les observations ont été réalisées par A. DICKO, hydrométriste du centre ORSTOM de BAMAKO. P. PARIENTE a effectué un stage de 6 mois sur le terrain et a assuré la partie modélisation de l'étude dans le cadre d'un Mastère Spécialisé en Maîtrise de l'Eau pour le Développement de l'Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts (ENGREF) de MONTPELLIER.

1.3.2 Moyens financiers

Le volet hydrologique a bénéficié des concours financiers de la CEE DG12 et de l'ORSTOM, Département Eaux Continentales, UR 2 DEC. Le matériel pour équiper le bassin versant a été en partie acheté sur le financement CEE (un limnigraphe, un pluviographe et les pluviomètres) et en partie prêté par le centre ORSTOM de BAMAKO. Les frais de fonctionnement se sont élevés en moyenne à 15 000 ECUS/an, financés à 50% par la CEE et 50% par l'ORSTOM.

Dispositif expérimental de l'étude hydrologique du bassin versant de KAMBO

Figure 1 Equipement hydro-pluviométrique

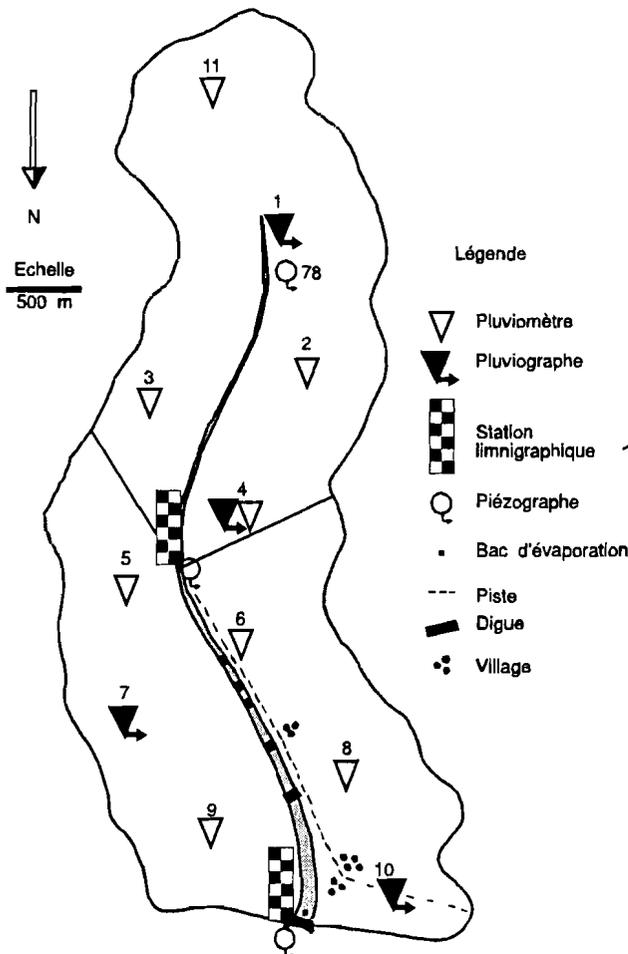
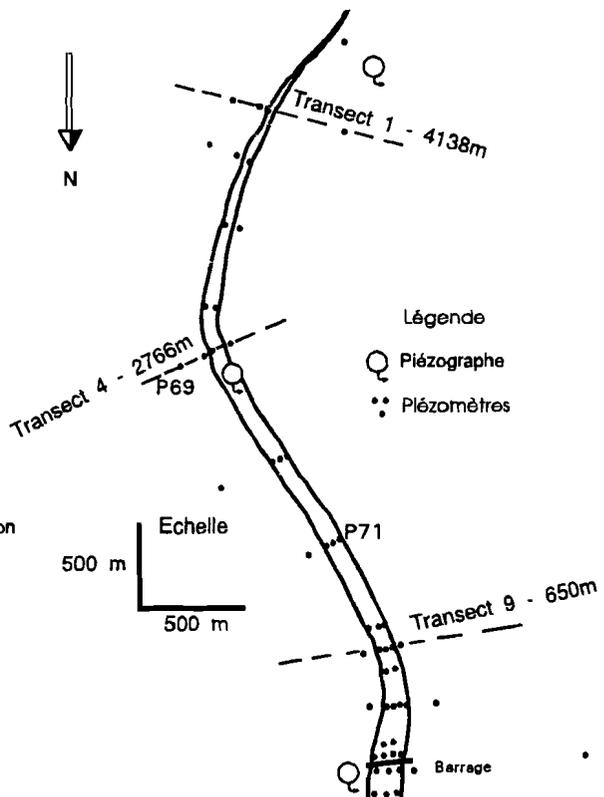


Figure 2 Equipement piézométrique



?

2. Facteurs climatiques de la zone de projet

2.1 Poste climatologique de référence

Le poste pluviométrique le plus proche du bassin est celui de KADIOLO où nous avons 32 valeurs de précipitations annuelles complètes (1954 à 1990). La moyenne de l'échantillon est 1084 mm et la médiane 1100 mm. Le poste agro-climatologique où sont mesurés tous les paramètres climatiques nécessaires au calcul de l'évapo-transpiration potentielle suivant la formule de PENMAN se trouve à SIKASSO à 80 km au nord du bassin étudié. A cette dernière station, il a été possible de constituer un échantillon de précipitations comprenant 72 années d'observations (1909 à 1990). La moyenne est de 1253 mm et la médiane, 1231 mm. L'évapotranspiration potentielle a été calculée suivant la formule de PENMAN pour les trois années de l'étude.

2.2 Pluviométrie interannuelle

Un ajustement statistique de 10 lois a été réalisé sur ces deux stations de longue durée. La loi qui s'ajuste le mieux au sens du test de BRUNET MORET (1969) a été retenue. Les valeurs de récurrence sont consignées dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Ajustement d'une loi de GOODRICH aux précipitations annuelles à KADIOLO (32 ans)

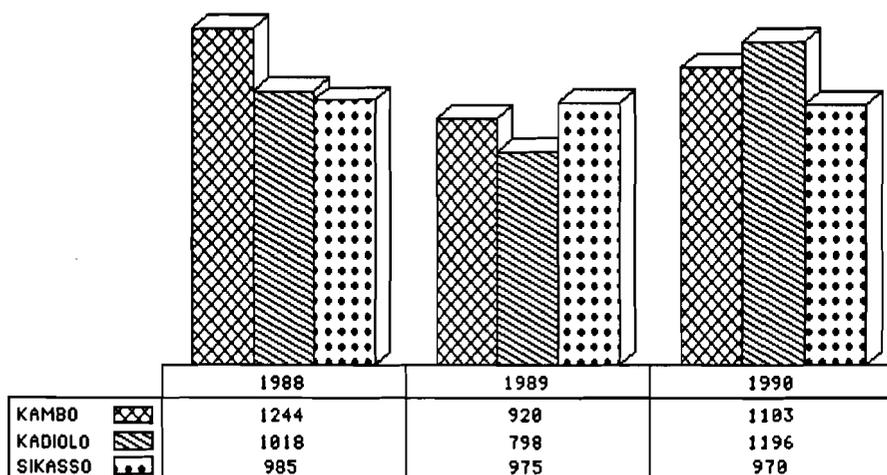
	Années sèches					Médiane	Années humides				
Probabilité	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Récurrence (an)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100
Précipitation (mm)	404	488	617	731	866	1104	1313	1411	1487	1568	1619

Tableau 3 : Ajustement d'une loi de PEARSON 3 aux précipitations annuelles à SIKASSO (72 ans)

	Années sèches					Médiane	Années humides				
Probabilité	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Récurrence (an)	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100
Précipitation (mm)	794	834	900	964	1048	1231	1445	1569	1676	1809	1901

La pluviosité supérieure à SIKASSO s'explique par le nombre d'années anciennes plus humides que dans la période actuelle. Durant la période de suivi du bassin, on a observé deux années proches de la médiane (1988 avec 1020 mm et 1990 avec 1190 mm) et une année nettement déficitaire (1989 avec 797mm). Les extrapolations et les calages des modèles seront donc plus fiables pour des années sèches et moyennes que pour des années excédentaires. La figure 3 compare la pluviométrie annuelle sur le bassin de KAMBO aux postes pluviométriques voisins pour la durée de l'étude.

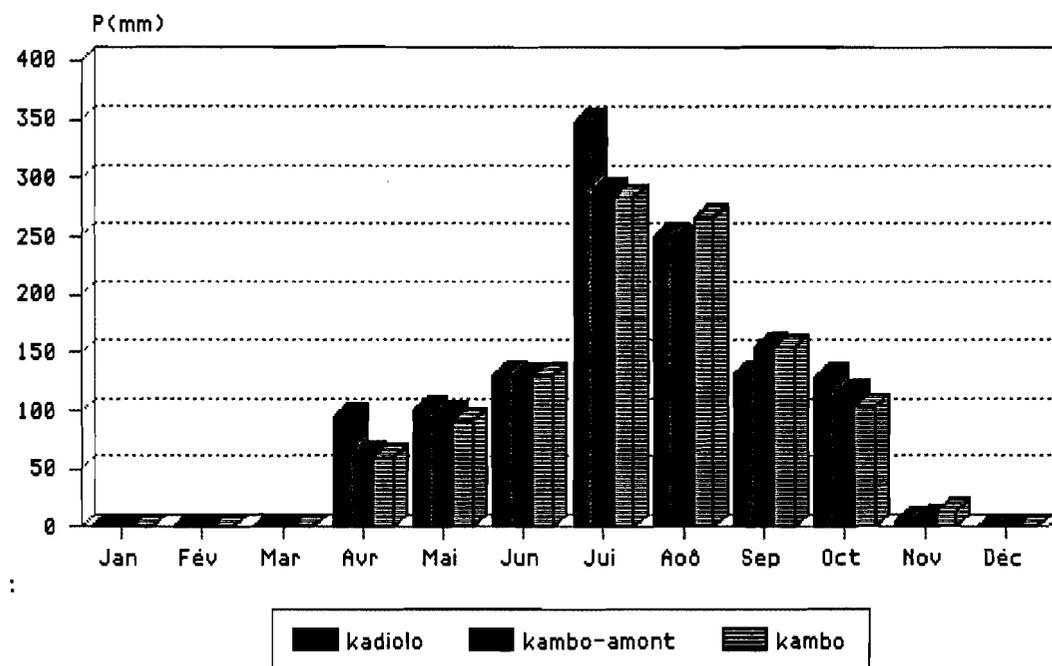
Figure 3 : Pluviométrie annuelle de KAMBO comparée à celles de KADIOLO et SIKASSO



2.2 Pluviométrie mensuelle

La répartition pluviométrique mensuelle est typiquement celle du climat soudano-guinéen avec une saison des pluies qui débute au mois de Mai et se termine au mois d'Octobre. Les mois les plus pluvieux sont Juillet et Août en général. Il arrive que Septembre soit maximum. La figure 4 donne la répartition des pluies mensuelles observées en 1990 et qui est représentative d'une année moyenne.

Figure 4 : Répartition des pluies mensuelles année 1990



2.3 Pluies journalières

Le pas de temps journalier est l'information de base des chroniques de précipitations. Cette donnée est un paramètre déterminant dans l'étude et le calcul des crues des petits bassins versants.

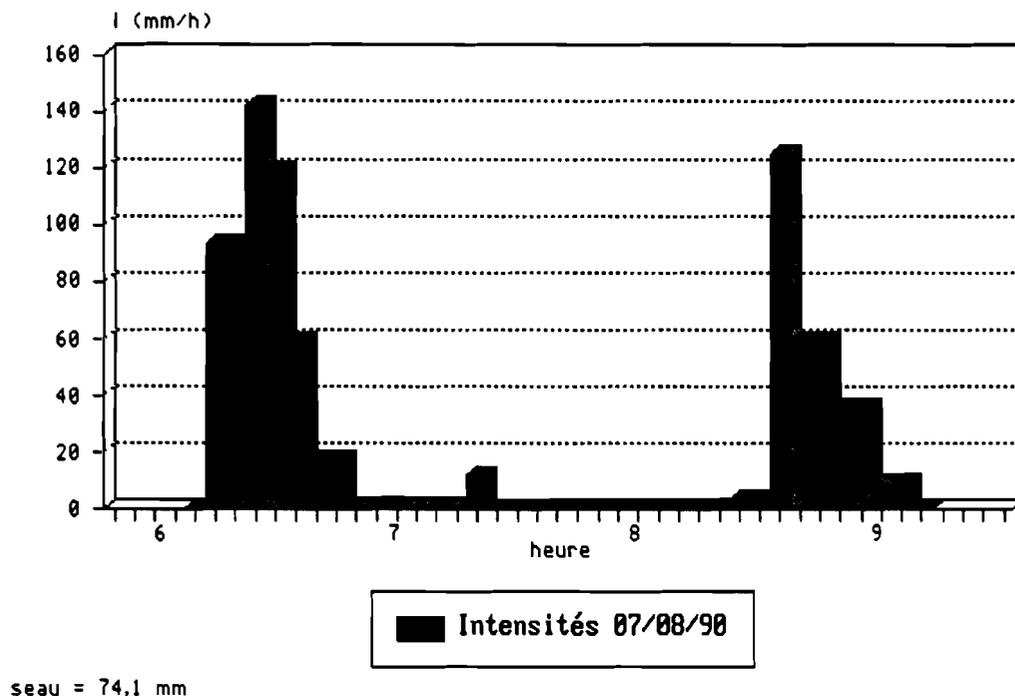
Une analyse statistique a été réalisée sur l'ensemble des pluies journalières des postes de SIKASSO et de KADIOLO en tenant compte de toutes les averses supérieures à 5 mm. La loi de PEARSON 3 tronquée s'ajuste le mieux aux échantillons. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 4. On constate que les deux stations présentent les mêmes caractéristiques. Ainsi l'averse de fréquence médiane à SIKASSO et à KADIOLO est respectivement de 92.6 mm et 95.4mm; l'averse de période de retour une fois tous les dix ans est de 114 mm à SIKASSO et 119 mm à KADIOLO

Tableau 4 : Précipitations journalières fréquentielles

STATION	PERIODE DE RETOUR					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
SIKASSO	92.6	100.9	114.1	127.5	145.2	158.6
KADIOLO	95.4	105.8	119	132.2	149.8	163.1

Les pluies ont deux formes caractéristiques suivant qu'elles ont pour origine une ligne de grains ou la mousson. Dans le premier cas il s'agit de tornades tropicales violentes à fortes intensités (fig.5). Dans le second cas, l'averse est plus longue et moins violente.

Figure 5 Averse du 5 Août 1990 enregistrée à KAMBO



2.4 L'évapotranspiration potentielle

Un bac «COLORADO» de 1 m² avec son dispositif flottant a été mis en service début mai 1990. Le tableau 14 donne les résultats des mesures journalières. Le bac est devenu flottant à partir du 06/08/90.

Le service national malien de la météorologie nous a communiqué les résultats des calculs de l'ETP pour le poste climatologique de SIKASSO le plus proche de notre bassin à environ 80 km à vol d'oiseau.

Le tableau 6 ci-après regroupe toutes les valeurs décadaires et mensuelles des 3 dernières années calculées d'après la formule de PENMAN la mieux adaptée aux conditions climatiques tropicales.

La figure 6 ci-dessous présente les courbes lissées des ETP moyennes mensuelles (en mm/jour) de ces 3 dernières années ainsi que les résultats mesurés au bac de KAMBO en 1990. Les valeurs du bac sont nettement inférieures (50%) à celles de l'ETP quand le bac devient flottant et ont tendance à être supérieures en saison sèche sur le peu d'observations collectées. Les mois faibles de septembre et octobre avec une moyenne égale ou inférieure à 2,5 mm/jour s'explique par l'abaissement des températures mais surtout par le fait que le bac est entouré de riz flottant sur 3 de ses côtés ce qui nuit à la circulation de l'air. L'effet thermique des parois du bac, ajouté à une bonne circulation de l'air, fait augmenter l'évaporation en saison sèche.

La différence entre l'évaporation du plan d'eau et l'ETP est importante. L'évaporation est un des termes prépondérants du cycle de l'eau en zone intertropicale. Une recherche doit être initiée pour permettre une estimation fiable de ce terme à partir des données climatiques d'un poste représentatif de la région. La modélisation du bilan hydrologique sera améliorée lorsque l'évaporation réelle du bassin pourra être définie avec plus de précision.

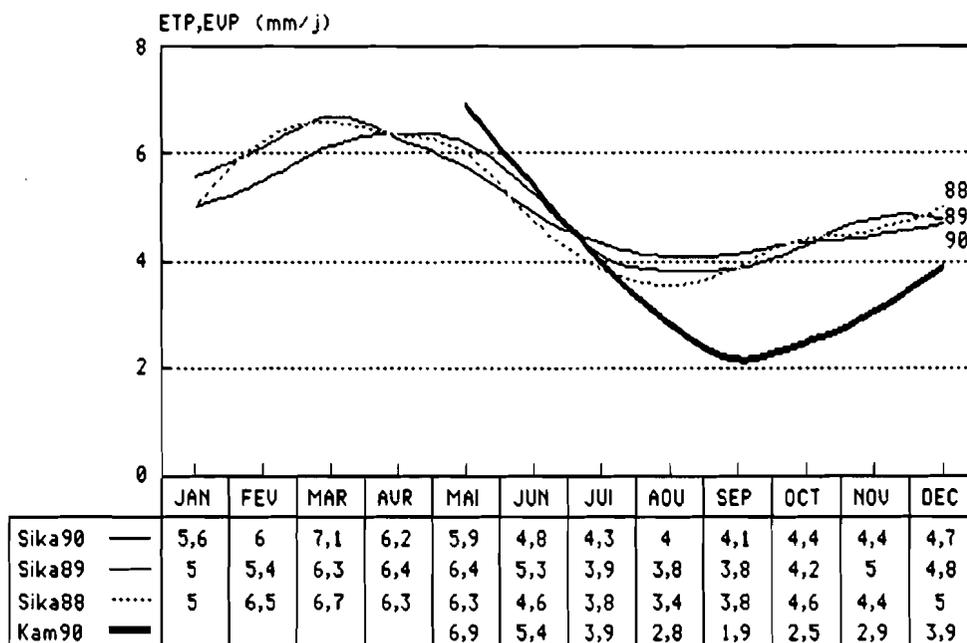
La figure 7 trace le bilan climatique 88-89-90 de précipitations à KAMBO et de l'ETP à SIKASSO. Sur 3 ans, le déficit pluviométrique s'élève à 756 mm en moyenne avec un maximum de 913 mm en 89 équivalant à la pluviosité de l'année.

Tableau 6 : ETP à SIKASSO en mm et évaporation sur le plan d'eau

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	ANNEE 1988
déca 1	50.3	60.8	70.0	61.7	70.0	51.0	36.2	37.1	36.5	44.5	44.8	49.5	
2	47.3	67.9	74.3	70.9	66.8	45.9	40.5	32.5	36.9	44.1	45.0	54.9	
3	56.2	59.4	64.0	55.6	58.3	40.7	40.9	34.8	39.4	49.1	41.4	51.6	
mois	153.8	188.1	208.3	188.2	208.3	188.2	195.1	137.6	117.6	104.4	112.8	137.7	1831
													ANNEE 1989
déca 1	56.1	51.8	66.9	65.4	65.6	62.3	40.8	38.2	35.2	39.9	50.4	48.2	
2	40.8	53.0	50.5	62.5	71.0	52.3	38.9	38.2	35.8	46.0	48.1	56.9	
3	57.2	46.4	78.1	64.2	63.0	44.7	42.1	40.6	42.7	45.5	50.8	43.2	
mois	154.1	151.2	195.5	192.1	199.6	159.3	121.8	117.0	113.7	113.7	131.4	149.3	1833
													ANNEE 1990
déca 1	51.8	64.5	72.1	63.0	58.8	53.6	46.9	34.0	38.7	46.7	44.4	47.1	
2	51.0	53.7	70.7	59.2	57.9	43.9	40.4	41.5	38.1	45.7	42.9	43.7	
3	69.7	49.1	76.2	63.0	66.1	47.2	45.4	48.2	45.6	50.1	45.6	54.4	
mois	172.5	167.3	219.0	185.2	182.8	144.7	132.7	123.7	122.4	142.5	132.9	145.2	1871
													Bac KAMBO
déca 1						61.8	50.2	32.3	19.7	21.8	29.5	32.8	
2					73.4	53.6	34.3	24.0	17.7	26.5	29.1	36.2	
3					70.7	46.5	36.0	30.4	19.0	29.5	28.8	47.6	
mois						161.9	120.5	86.7	58.4	77.0	87.4	116.6	

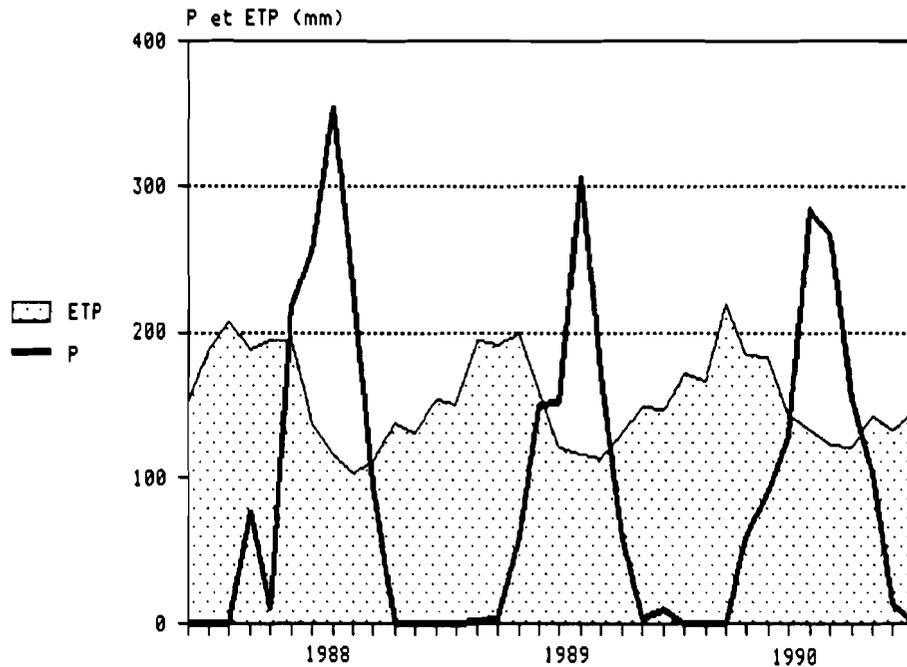
Figure 6

EVAPOTRANSPIRATION à SIKASSO et EVAPORATION sur bac à KAMBO



Bac flottant d'août à déc.

Figure 7: Bilan climatique à KAMBO



3. Caractéristiques physiographiques du bassin versant et du bas-fond

3.1 Le bassin versant

Les caractéristiques physiques du bassin sont résumées dans le tableau 6 ainsi que la courbe hypsométrique sur le tableau 7 (et figure 8). Cette courbe approximative a été faite à partir des courbes de niveau tracées sur photos aériennes au 1/50 000è.

La pente sur les versants est régulière des crêtes vers le bas-fond sur tout le pourtour. L'altitude, en nivellement général, du zéro de l'échelle aval a été estimée à 320 m d'après la carte au 1/200 000è de NIELLE (feuille NC.30-XIII) et le sommet du bassin vers 342 m. La pente moyenne, comprise entre 5% et 95% de la superficie est de 2,84 m pour 1 km. La partie amont est un peu plus pentue : 4 m pour 1 km.

La forme du bassin est allongée avec un indice de compacité de 1,42. La couverture végétale est de type savane arbustive mais de grandes zones sur les versants ont été dégagées pour les cultures. Environ les 2/3 du bassin sont cultivés. Toutes les cultures se font sur billons perpendiculaires à la pente. Le couvert végétal varie beaucoup entre la saison sèche et la saison des pluies.

Le sol sur les versants est de type ferrugineux tropical remanié avec un taux élevé de gravillons ferrugineux, il peut être classé comme terrain perméable, propriété accentuée par le mode de culture. Le sous-sol du secteur est cartographié comme une zone à socle granitique type granite orienté à biotite avec peu d'affleurement en surface (carte de la DNGM de 1981 au 1/1.500 000).

Tableau 6 : CARACTERISTIQUES des BASSINS AMONT et AVAL

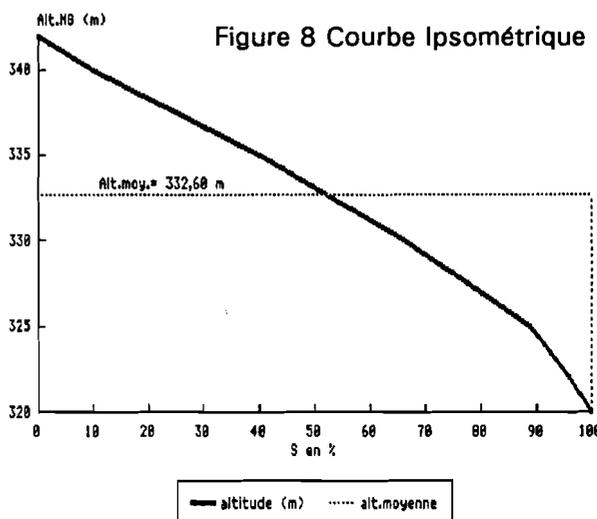
	AMONT	BARRAGE
Coordonnées exutoires	10°36''20"10°37''50"	-5°47''15"-5°47''40"
S, Superficie (km ²)	4.7	10
P, Périmètre (km)	9.5	16
A, Altitude du zéro de l'échelle (N.G) (m)	325.6	320
Kc, Indice de compacité	1.23	1.42
L, Longueur du rectangle équivalent (Km)	3.36	6.47
l, largeur du rectangle équivalent (Km)	1.4	1.55
Ig, Pente moyenne (entre 5% et 95% de S) (m/km)	4.01	2.84
Ip, Indice de pente de ROCHE ¹	0.068	0.059
A, Altitude moyenne (d'après courbe (m)	336	332.60
Paramètres morphologiques		
Classe du relief (méthode RODIER-AUVRAY)	R2	R2
« « (méthode OLIVRY)	R2-0	R1-6
Classe de perméabilité	P3-4	P3-4
Classe de couverture végétale (OLIVRY)	V2-3	V2-3

Tableau 7 :

Courbe hypsométrique de KAMBO (10 Km²)

Altitude m	Superficie (km ²)	%
340-342	1.0	10
335-340	3.05	30.5
330-335	2.55	25.5
325-330	2.27	22.7
322-325	0.71	7.1
320-322	0.42	4.2

Figure 8 Courbe Ipsométrique



3.2 Le bas-fond

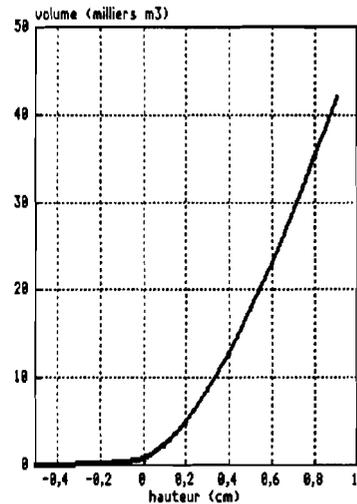
Le bas-fond de KAMBO est très allongé et peu large, en moyenne entre 50 et 100 mètres. La superficie cultivable est de l'ordre de 25 ha d'après les photos aériennes. Le sol est de type hydromorphe limono-argileux avec une couche argileuse un peu plus épaisse vers l'aval. La pente n'est pas régulière, faible dans la première partie devant le barrage, moins de 1% sur 1 km, elle passe à 2.5 % entre 1 et 3 km pour terminer à environ 4% dans la partie haute. Une bosse est observée entre 2 et 3 km en amont du barrage et la pente reprend en aval = 3% . L'emplacement du barrage paraît le plus judicieusement choisi au vu du profil. La perméabilité, mesurée par l'IER-CIRAD, est forte. Les résultats des analyses granulométriques indiquent un pourcentage de sables fins et grossiers importants à toutes les profondeurs des profils du bas-fond (cf. rapport IER-CIRAD mai 1990). Les sols ont un Ph voisin de 5. Il peut être classé dans les bas-fonds des régions soudano-guinéennes (1100mm < P < 1400mm), classification de la synthèse préliminaire (ALBERGEL, 1988)

L'alimentation en eau du bas-fond se fait soit directement par la pluie, soit par le ruissellement des versants après une forte averse, soit par un drainage des versants saturés quand la saison des pluies est bien avancée et que la nappe phréatique se trouve à son maximum. Le tableau 8 résume les caractéristiques de ce bas-fond. La figure 9 donne la courbe volume hauteur de l'eau dans le bas-fond. Cette dernière résulte d'un levé topographique précis.

Figure 9 : Courbe Volume -hauteur du bas-fond de KAMBO

Tableau 8 :
Caractéristiques du Bas-fond

Longueur	4 km
Superficie	25 ha
Pente moyenne	2.8 m/km
Surface inondée/barrage plein	6 ha
PH (d'après IER)	4.3 à 5.5
Perméabilité mesurée (par IER)	5.7 à 18 cm/h



4. Ecoulements de surface

4.1 Ecoulements annuels et mensuels

Le tableau 9 ci-dessous donne les résultats du bilan hydrologique annuel pour les 3 années suivies ainsi que l'ETP annuelle de SIKASSO (PENMAN). Les graphiques «camemberts» regroupés sur la figure 10 montrent distinctement la faiblesse de tous les écoulements de surface confondus, avec un maximum de 5,1% en 1988, année qui correspond à la plus abondante pluviométrie et surtout au plus grand nombre de fortes précipitations. Le partage des écoulements entre ruissellement (ou écoulement rapide de crue) et écoulement de base alimenté par la nappe indique un pourcentage plus élevé pour ce dernier en 1990. Les précipitations comprises entre 20 et 30 mm, nombreuses en 90 (17), jouent un rôle important dans l'alimentation de la nappe. Les très fortes averses en 88 ont augmenté la part du ruissellement qui représente 44% des écoulements pour cette année-là et seulement 30 et 23% en 89 et 90.

Tableau 9 : Bilan hydrologique annuel

KAMBO	Pmoy. mm	Lé mm	Lr mm	Déf.écoul. mm	ETP mm
Barrage					
1988	1244	62.9	27.4	1181	1831
1989	920	32.8	9.88	887	1833
1990	1103	35.4	8.05	1068	1871
Amont					
1989	866.5	0.54	0.46	866	
1990	1107	4.99	3.16	1102	

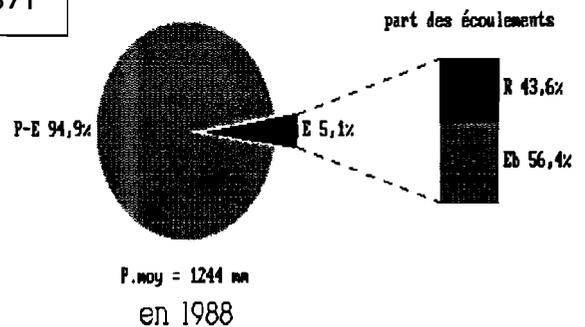
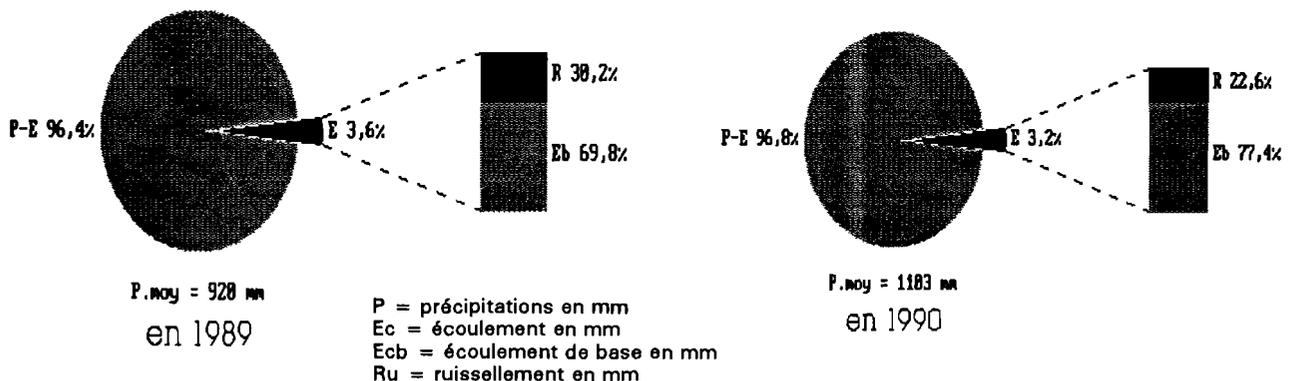


Figure 10 : Bilan hydrologique annuel à KAMBO



L'échantillon de l'étude de KAMBO, avec 3 années d'observation, est très réduit et concerne des années à pluviosité proche de la moyenne. Il est vain de rechercher une relation statistique entre la pluie et l'écoulement. Un modèle conceptuel permet de reconstituer les apports à l'échelle journalière.

Les lames écoulées mensuelles (Ec) ont été calculées à partir des débits moyens mensuels et les lames ruisselées (Ru) déduites du tableau 10, ce qui nous permet de présenter ci-dessous les différents termes du bilan mensuellement.

Tableau 10 : VALEURS MENSUELLES du bilan hydrologique en mm

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	ANNEE 1988
P	0	0	0	(77.5)	(9.6)	(219.0)	255.2	355.3	231.0	96.4	0	0	
ETP	153.8	188.1	208.3	188.2	195.2	195.1	137.6	117.6	104.4	112.8	137.7	131.2	
Ec	0	0	0	0	0	0	6.08	31.07	22.37	3.43	0	0	
Ru	0	0	0	0	0	0	4.95	16.92	5.42	0.10	0	0	
ANNEE 1989													
P	0	0	1.2	4.2	59.5	150.7	153.3	306.5	172.4	58.1	3.2	10.5	
ETP	154.1	151.2	195.5	192.1	199.6	159.3	121.8	117.0	113.7	131.4	149.3	148.3	
Ec	0	0	0	0	0	0	0	15.96	7.41	7.79	1.57	0	
Ru	0	0	0	0	0	0	0	8.42	1.46	0	0	0	
ANNEE 1990													
P	0	0	0	60.1	91.6	129.7	283.5	266.3	154.0	103.9	13.7	0	
ETP	172.5	167.3	219	185.2	182.8	144.7	132.7	123.7	122.4	142.5	132.9	145.2	
Ec	0	0	0	0	0	0	0	13.52	9.38	9.19	3.24	0.10	
Ru	0	0	0	0	0	0	0	7.20	0	0.85	0	0	

P = précipitations en mm
 ETP = évapotranspiration de PENMAN en mm
 Ec = écoulement en mm
 Ru = ruissellement en mm

4.2 Ecoulements journaliers

Le tableau 11 donne les débits moyens et le débit journalier maximum observé pour les trois années d'observations du bas-fond

Tableau 11 : Débits journaliers à KAMBO.

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Qj88	Qjm88
K. barrage	0	0	0	0	0	.007	22.7	116	86.3	12.8	0	0	19.9	699
Qj89 Qjm89														
K. barrage	0	0	0	0	0	0	0	59.6	28.6	29.1	6.07	0	10.4	311
K. amont	0	0	0	0	0	.268	.066	.614	0	0	0	0	.079	3.86
Qj90 Qj91														
K. barrage	0	0	0	0	0	0	0	50.5	36.2	34.3	12.5	.382	11.2	307
K. amont	0	0	0	0	.002	0	.011	7.99	.636	.149	0	0	.744	84.8

Débit en l/s
 Qj = débit moyen journalier annuel en l/s
 Qjm = débit journalier maximum observé en l/s

Le modèle de reconstitution de l'écoulement journalier utilisé a été "GR3 - CEMAGREF de MICHEL & EDIJATNO (1989) (PARIENTE 1990). C'est un outil de transformation des pluies en débits à l'exutoire d'un bassin versant, dont l'architecture repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire; trois opérateurs qui dépendent chacun d'un seul paramètre :

- Le réservoir sol, dont la seule sortie est le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle, commande la répartition de la pluie nette et le sous modèle de routage. Il est caractérisé par sa capacité A, premier paramètre du modèle. Son niveau S est soumis soit à la pluie (P-E), soit à l'ETP (E-P), et permet de définir la fraction de pluie qui accédera au second réservoir " eau gravitaire "

- Le réservoir eau gravitaire, reçoit en début de pas de temps la majeure partie des débits routés par l'hydrogramme unitaire ; une faible partie des sorties de l'hydrogramme rejoint directement la rivière.

Ce second réservoir est caractérisé par sa rétention maximale à un jour B (second paramètre du modèle) exprimée en mm. Sa loi de vidange est quadratique. Son niveau R détermine le débit Q (lame d'eau journalière) qu'il peut relâcher.

- L'hydrogramme unitaire, décrit la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir. Il permet de réaliser un décalage progressif entre l'apparition de la pluie brute et l'introduction de la pluie nette qui en résulte dans le réservoir R pour produire au même moment, le débit Q. Il dépend d'un seul paramètre (troisième du modèle), sa durée ou temps de base C exprimée en jour. Cet hydrogramme est de forme parabolique.

Le calage du modèle se fait par optimisation des paramètres en utilisant des fonctions critères qui mesurent un écart entre la chronique des valeurs de débit calculées et observées. Le modèle GR3 utilise 4 critères pour cet optimisation :

- Un critère global d'appréciation, critère de NASH & SUTCLIFFE, 1970,
- Un critère "erreur de bilan", représentant l'erreur de l'évaluation de débit à l'échelle de l'année
- Le rapport des crues, ce critère permet de juger la bonne reconstitution des fortes crues
- Le rapport de durée, ce critère calcule le rapport des durées de crue et celui des durées d'étiages (calculé/observé); ces rapports doivent être le plus proche de un.

Le calage du modèle a été réalisé sur les trois années d'observation : les valeurs des paramètres sont les suivants :

- Réservoir sol A = 478 mm
- Réservoir eau gravitaire B = 32 mm
- Hydrogramme unitaire C = 1.34 jours

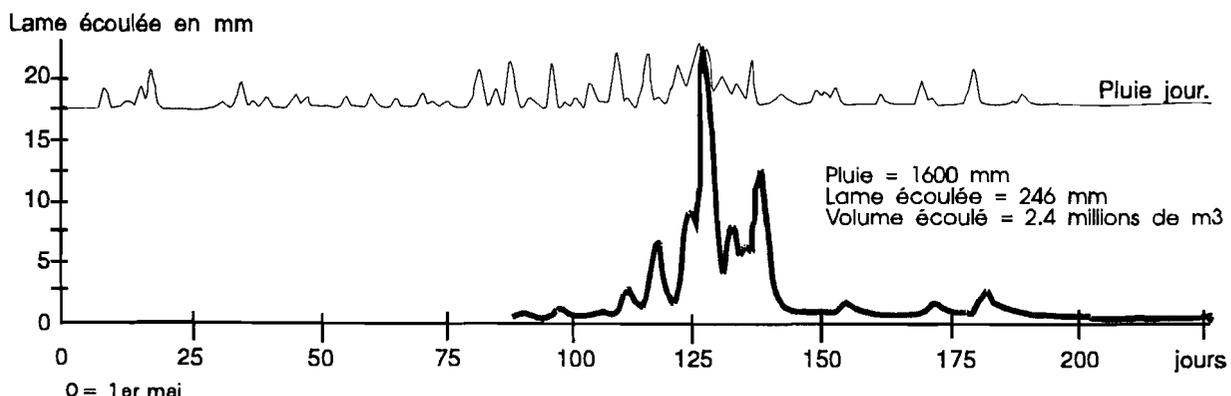
Les valeurs des critères sont les suivants :

- Critère de NASH : 54.4%
- Erreur de bilan : 5.2%
- Rapport des crues : 91.3% ce qui rend compte d'une bonne reconstitution des crues
- Ce qui est confirmé par le fort rapport des crues : 36 "calculées" pour 31 "observée"
- Le rapport des durées d'étiages est inversé : 459/492

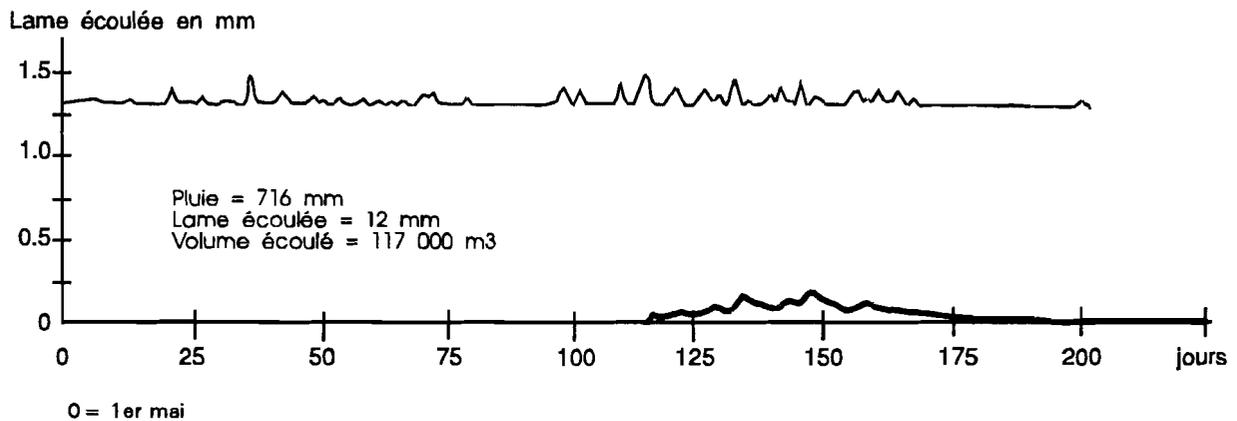
Une simulation a été réalisée à partir des données de pluies journalières observées à KADIOLO (1963- 1987). La figure 11 montre la simulation pour une année forte 1964 (1600mm) et une année faible 1984 (716mm). Les années 1982 (607 mm) et 1983 (433 mm) ont donné un écoulement pratiquement nul. La lame écoulée en année moyenne est de 84 mm, de 11 mm pour une année décennale sèche et de 200 mm pour une année décennale humide.

Figure 11

Lame d'eau écoulée simulée - station KAMBO BARRAGE
Année 1964



Lame d'eau écoulee simulée - station de KAMBO BARRAGE
Année 1984

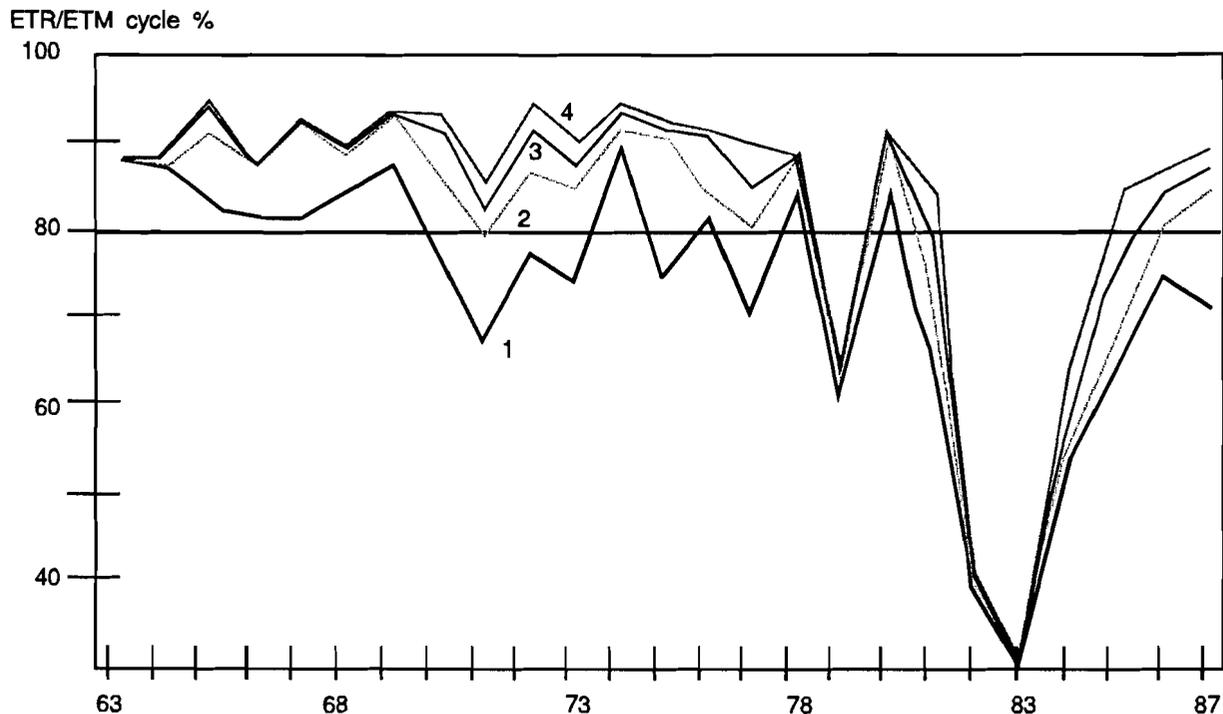


A partir de ces résultats de débits il a été possible de simuler les hauteurs d'eau dans le bas-fond avec ou sans aménagement et de constituer des fichiers des apports d'eau à la culture sous forme de fichiers de pluies corrigées. Ces fichiers servent d'entrée au modèle de bilan hydrique des cultures BIPODE (VAKSMAN, 1990) qui génère dans différents cas de figure les rapports (ETR/ETM) pour le cycle du riz. Ce modèle et son couplage avec la simulation des écoulements sont décrits par PARIENTE (1991). La figure 12 donne les courbes des coefficients de satisfaction des besoins en eau pour différents cas de figures :

- courbe 1 : Simulation sans aménagement
- courbe 2 : Simulation avec aménagement, partie amont du bas-fond non concerné par l'inondation
- courbe 3 : Simulation avec aménagement, partie moyenne du bas-fond, domaine du riz semi-flottant
- courbe 4 : Simulation avec aménagement, partie aval du bas-fond domaine du riz flottant.

Figure 12

Coefficients de satisfaction des besoins en eau
de la culture du riz à KAMBO (PARIENTE, 1990)



Les résultats, bien que peu différents dans 3 tranches d'influence de la retenues sont logiquement meilleurs dans la tranche 3 (courbe 4) avec une moyenne de 83%, que dans la tranche 2 (courbe 3) avec une moyenne de 81 % et dans la tranche 1 (courbe 2) avec une moyenne de 79%.

D'une façon générale, l'intérêt du barrage semble évident lorsque l'on compare ces premiers résultats avec ceux obtenus dans la situation simulée sans aménagement (courbe 1), où la moyenne des coefficients de satisfaction des besoins en eau est tout juste de 73 %.

On s'aperçoit de même, que le seuil inférieur de 80% est rarement passé dans la zone d'influence de la retenue; à l'exception des années particulièrement sèches (1979, 1982 à 85), où les courbes rejoignent celle de la situation sans barrage. Ce seuil n'est atteint que 4 années sur 10 dans la situation simulée sans barrage.

Le décalage obtenu, à travers ces coefficients, entre la situation simulée sans barrage et celle simulée avec l'aménagement, se fait essentiellement durant les années moyennes et de façon moins marquée, durant les bonnes années en terme de pluviométrie. Dans le volet agronomique, un modèle traduit cette notion de satisfaction en eau en terme de rendement de la culture.

4.3 Etudes des crues

4.3.1 Station Amont (1989-1990)

Le volume écoulé à cette station est très faible (0.6 mm en 1989 et 5 mm en 1990). 11 crues ont donné lieu à des ruissellements quantifiables en 1989 et 12 en 1990. Le tableau 11 récapitule les principales caractéristiques des crues dont le débit de pointe a dépassé 80 l/s.

Tableau 11 CARACTERISTIQUES DES CRUES 89-90 à la station KAMBO-Amont

Date	Pmoy mm	I 5mn mm/h	I 10mn mm/h	Qmax l/s	Tm h:min	Tb H:min	Vol ruis m3	Lr mm	Qs l/s/km2	Kr %
15.06.89	23.1	75	33	86.5	0:45	4:00	86	0.02	18.4	0.1
05.08.90	44.9	192	171	349	3:25	18:30	6084	1.3	74.3	2.9
07.08.90	34.3	48	24	235	3:20	17:30	6477	1.38	50	4.0

Pmoy = pluie moyenne, I5 = Intensité en 5 minutes, I10 = Intensité en 10 minutes,
Q max = débit maximum, Tm = temps de monté, Tb = Temps de base, Vol ruiss = Volume ruisselé
Lr = Lamme ruisselée, Qs = débit spécifique de pointe, Kr = coefficient de ruissellement

Seules les 2 crues des 5 & 7 Août 1990, avec des volumes de plus de 6000 m3 ont eu une répercussion jusqu'à la station aval. Pour ces deux crues, les temps de montée sont de 3 heures et les temps de base de 18 heures environ. La lenteur de l'écoulement est dû à l'allongement du bassin et aux diguettes de cultures dans le lit même du marigot. Le plus fort coefficient de ruissellement est obtenu à la crue du 7/08/90 avec 4%, ce qui, compte tenu de l'important épisode pluvieux de fin Juillet, début Août est très faible.

4.3.2 Station aval (barrage) 1988-89-90

Les caractéristiques de crues susceptibles d'être individualisées en 88-89-90 et dont le débit maximum a dépassé 100 l/s, sont regroupées sur le tableau 12. Les volumes déversés suite à des ouvertures de vannes sont considérés comme des volumes ruisselés car elles interviennent à la suite d'événements pluvieux ou ont lieu en cours de crue. Les toutes petites crues avec un débit maximum (QME) inférieur à 50 l/s sont considérées comme des gonflements de la nappe. Il est impossible de séparer les écoulements hypodermiques très retardés des apports de la nappe.

Tableau 12 CARACTERISTIQUES DES CRUES 88-89-90 à la station KAMBO Barrage

Date	Pmoy mm	I5 min mm/h	I10 min mm/h	QME l/s	QMR	Tm h:min	Tb h:min	Vr millier m3	Lr mm	Ke%	Qs l/s/km2
14.07.88	61.4	90	78	1110	1080	7:00	34:00	49.5	5	8.1	111
15.08.88	**	**	**	456	410	32:00	54:00	33.5	3.35	**	45.6
17.08.88	**	**	**	368	358	42:00	48:00	24.5	2.5	**	36.8
28.08.88	47.8	(27)	(27)	1280	1110	12:00	60:00	93.1	9.31	19.5	128
25.09.88	62.2	(30)	(30)	470	450	18:00	90:00	39.2	3.92	6.3	47
09.08.89	85.4	70	59	506	453	30:00	83:00	53.5	5.35	3.26	50.6
19.08.89	**	**	**	330	330	00:10	29:00	9.36	0.94	**	33
24.08.89	**	**	**	349	349	23:50	65:30	21.3	2.13	**	34.9
07.08.90	54.0	142	119	940	930	5:45	76:15	59.4	5.94	11	94
30.08.90	23.4	72	66	125	89.1	38.3	77.3	9.93	0.99	4.23	12.5

Pmoy = pluie moyenne, I5 = Intensité en 5 minutes, I10 = Intensité en 10 minutes,

** pas de pluie attribuée (ouverture de vanne + pluie)

QME = débit maximum écoulé, QMR = débit maximum ruisselé, Tm = temps de monté, Tb = Temps de base,

Vol ruis = Volume ruisselé, Lr = Lamme ruisselée, Qs = débit spécifique de pointe, Ke = coefficient d'écoulement

Les hydrogrammes de crues à cette station du barrage peuvent prendre des formes très différentes suivant l'état de la retenue et la configuration des batardeaux (vannes) à l'arrivée de la crue. L'écrêtement des crues est dû au seuil très large de la digue et à la précision au centimètre seulement. La figure 48 donne un exemple des 4 types de crues possibles :

- 1 - retenue vide - 2 vannes ouvertes et débordements sur digue
- 2 - retenue pleine - 2 vannes fermées et débordements sur digue
- 3 - retenue ½ pleine - remplissage et débordement sur digue, ensuite ouverture d'une vanne puis 2 vannes
- 4 - retenue presque pleine - ouverture de 2 vannes.

A partir des quelques crues observées au barrage, il est difficile de produire un hydrogramme médian. On retiendra des données de crues :

- le plus important débit maximal ruisselé (QMR = 1110 l/s) et écoulé (QME = 1280 l/s) a été observé à la crue du 28/08/88, très écrêté au passage sur la digue et présentant plusieurs paliers à la décrue. Cette crue intervient quand le barrage est plein avec un déversement de débit de base (132 l/s) et sur un sol très humide après plusieurs averses les jours précédents. A cette crue, le coefficient de ruissellement (Kr = 19.5%) calculé sur la seule précipitation du 28/08 est sans doute surestimé car le volume doit inclure une partie de la production des précipitations antérieures (22,4 et 28,2 mm les 27 et 26/08)

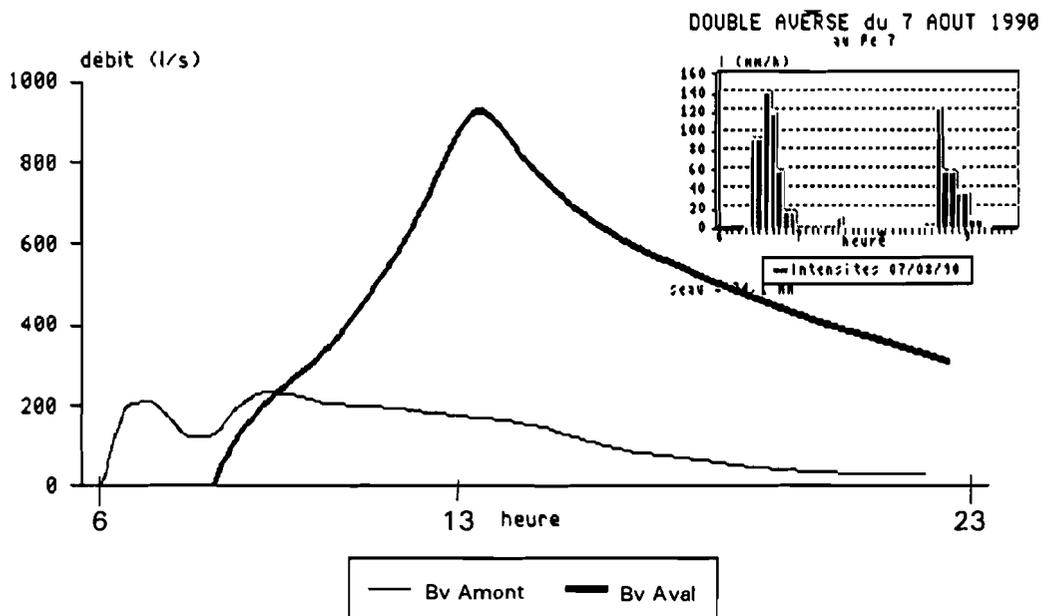
- le volume déversé de la crue du 28/08/88 correspond à 3 remplissages de la retenue (Lr = 9,31 mm). On remarque qu'en 88, année de fortes précipitations, il y a eu 5 crues susceptibles de remplir la retenue au moins une fois (alors qu'en 89 et 90, on ne trouve qu'une seule crue d'importance) avec pour cette crue des volumes déversés équivalant à 2 fois la capacité de la retenue

- vu l'allongement du bassin et la séparation du bassin amont par un passage routier, les temps de montées et de base sont très variables suivant la forme et la position des averses ainsi que l'état de la retenue

- durant les 3 ans d'étude, aucune averse de fréquence décennale n'a été observée.

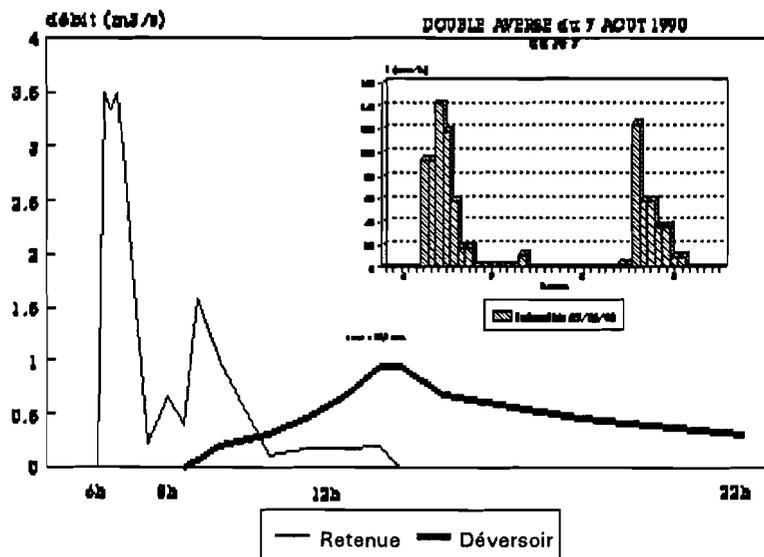
La figure 13 donne les courbes lissées des hydrogrammes amont et aval de la crue du 07/08/90. A la station aval, une deuxième pointe a été provoquée le 08/08 par l'ouverture des vannes.

Figure 13 crue du 7 Août 1990



A la station Aval les crues sont laminées par le barrage. En phase de remplissage de la retenue principale avec vannes fermées, il est possible de reconstituer les hydrogrammes en conditions naturelles grâce à la courbe volume / hauteur de la retenue (fig 7); le débit en amont du barrage étant obtenu par le rapport DV/DT en l/s. La figure 14 présente l'hydrogramme reconstitué, du 7/08/90 dans la retenue et le passage de la crue à la digue déversante avant l'ouverture des vannes le 08/08. L'amortissement de la pointe de crue est bien mise en évidence avec une diminution du débit maximum de 3.5 m³/s à moins de 1 m³/s.

Figure 14 : Laminage des crues, exemple du 07/08/80



4.3.3 Etude des crues exceptionnelles - Crues d'étude - Crues de projet

Ce type de bassin, perméable avec un Q max relativement faible, peut avoir un comportement hydrologique totalement différent lors des averses exceptionnelles. DUBREUIL (1960) décrit ainsi une averse ponctuelle de 179 mm relevée sur le bassin versant de BANANKORO d'une superficie de 68 km² (à quelques km de notre site d'étude) le 20 Août 1959. Cette pluie exceptionnelle (de récurrence centennale) a donné un débit spécifique observé de 765 l/s/km² sur le bassin versant de BANANKORO. Ce débit spécifique a été estimé par DUBREUIL à 2700 l/s/km² pour un bassin de 10 km². Elle aurait donné un débit maximum de 26 m³/s à KAMBO.

Le calcul de la crue d'étude a été réalisée en utilisant la méthode ORSTOM (RODIER-AUVRAY) amélioré (RODIER & RIBSTEIN, 1989) et la méthode du CIEH. Pour ces deux méthodes la crue d'étude est définie comme étant une crue résultant d'une averse de récurrence décennale survenant au milieu de la saison des pluies lorsque les facteurs conditionnels du ruissellement (végétation, humidité des sols...) sont moyens. La crue de projet est définie par la récurrence de l'événement pour lequel l'aménageur estime devoir protéger les infrastructures mises en place et qui est au moins décennale. On fait l'hypothèse que le rapport du débit maximum de la crue de projet sur celui de la d'étude est égal au rapport de la pluie de la crue de projet sur celle de la crue d'étude.

Méthode ORSTOM

Le tableau 6 des caractéristiques du bassin permet de se référer à une série d'abaques. Le maximum de la crue d'étude est obtenu par la formule suivante

$$Q_{10} = \alpha \cdot S \cdot Kr_{10} \cdot (P_{10} \cdot k) \cdot T_b$$

En adoptant les valeurs suivantes pour KAMBO

- P₁₀, averse décennale = 119 mm
- k, coefficient d'abattement = 0.88 (VUILLAUME 1974)
- Kr₁₀, coefficient de ruissellement = 23%
- rapport $\alpha = Q_{10} / Q_M = 2,5$ correspondant à la zone
- T_b Temps de base, 20 heures
- D_b, débit de base estimé à 7% à ajouter à Q₁₀

On trouve :

$$Q_{10} \text{ max} = 9 \text{ m}^3/\text{s}$$

La méthode CIEH (PUECH - CHABI GONNI in BERTON 1988) par utilisation des abaques donne :

$$\begin{aligned} Q_{10} &= 12 \text{ m}^3/\text{s} \text{ abaques B (sans estimation du } Kr_{10}) \\ Q_{10} &= 11 \text{ m}^3/\text{s} \text{ abaques D avec } Kr_{10} \text{ 23\%} \end{aligned}$$

Le rapport technique de l'aménagement, réalisé par l'AFVP, donne le chiffre de 15 m³/s pour le Q₁₀ sans spécifier la méthode utilisée. Il y a peu d'écart entre les résultats ORSTOM et CIEH.

Les aménagements créent une grande dispersion dans les résultats des ruissellements de crues. L'effet d'amortissement ou «tampon» du barrage est très net quand la retenue est en cours de remplissage. Il n'a pas été possible de définir des crues unitaires pour faire une prédétermination de la crue d'étude à partir du modèle de l'hydrogramme unitaire.

La crue d'étude calculée correspond à un volume ruisselé d'environ 240 000 m³, soit l'équivalent de 9 fois la capacité de la retenue à condition que cette crue se produise quand la saison de pluie est déjà bien avancée, avec une nappe engorgée et des sols saturés. Nous pouvons la comparer à la crue du 28/08/88 qui a déversé près de 100 000 m³ pour une précipitation de 50 mm survenant après 2 jours de pluie de moyenne importance.

L'ouvrage réalisé : barrière anti-drainage, mur d'étanchéité, massif de pierres libres et tapis filtrant à l'aval, prévu pour une crue décennale plus conséquente, peut supporter ce type de crue, à condition d'y effectuer un entretien minimum au niveau de l'arête bétonnée imparfaitement plane et veiller à la remise en place des blocs à chaque hivernage.

4.4 Remplissage de la retenue, étude des tarissements

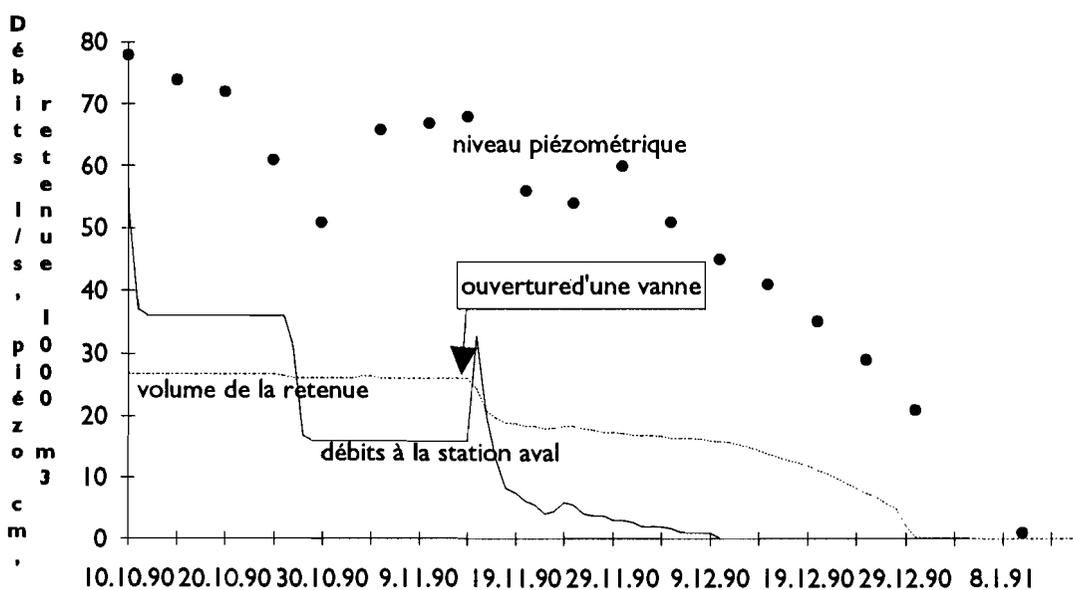
Les volumes moyens journaliers stockés sur 4 mois, de début août à fin novembre, ont été respectivement de 24 800 en 88, 21 000 en 89 et 23 600 m³ en 90. Les différences proviennent des manipulations des vannes car une fois la nappe engorgée à l'aval et le premier plein acquis, survenu chaque année dans la première décennie d'août, la pluviométrie et l'écoulement de base ont été suffisants pour maintenir la retenue pratiquement pleine jusqu'en décembre, soit entre un et deux mois après la fin de la saison des pluies. Dès la mi-novembre, en 89 et 90, une vanne a été retirée pour pouvoir effectuer la récolte du riz dans de meilleures conditions. En 88, la retenue est laissée pleine jusqu'au tarissement de la nappe à la mi-décembre. Le décalage de temps observé entre les tarissements de 89 et de 90 correspond aux différences de stockage dans les aquifères directement en rapport avec le cumul pluviométrique de l'année.

Le remplissage de la retenue ne commence que début août quand la nappe est affleurante au niveau du sol et se trouve à l'horizontale avec la nappe phréatique des versants. La remontée de la nappe se fait par paliers à partir de la deuxième quinzaine de juillet. Cette remontée est liée à l'important cumul pluviométrique du mois d'août (cf. fig. 4). Pour le remplissage, il faut donc environ 550 mm de précipitations tombées d'avril à fin juillet, ce qui signifie que pour les années à faible pluviométrie, il y a peu d'espoir de maintenir une lame d'eau derrière le barrage, même si une forte pluie en assure le remplissage temporaire. Des pluviosités annuelles très déficitaires se sont déjà produites, à l'exemple de 1983 (413 mm) et de 1982 (543 mm) au poste de KADIOLO.

Pour éviter la submersion du riz, des manipulations de vannes sont nécessaires tout le mois d'août et même début septembre. Ensuite, les vannes restent fermées jusqu'à la récolte à la mi-novembre. Les manipulations judicieuses des vannes par les cultivateurs, à partir de 1989, démontrent une bonne appropriation de l'ouvrage et une grande discipline collective des propriétaires de parcelles notamment pour les semis et les repiquages .

La vitesse de la vidange de la retenue après l'arrêt des écoulements a été de 2 cm/jour entre le jour de la fin du déversement et l'assèchement de la mare. Dès que la nappe de plateau atteint la cote 20 de l'échelle du barrage le tarissement de la retenue est rapide. La figure 15 montre sur un même graphique la décroissance des débits déversés sur la digue, celle du niveau de la nappe de plateau et celle des volumes d'eau dans la retenue pour l'année 1990. Les paliers de la courbe des débits déversés s'expliquent par le manque de précision sur l'estimation de la hauteur de la lame déversante.

Figure 15 : Tarissement année 1990 - Comparaison du niveau de la nappe, des débits sortant, et du niveau piézométrique.



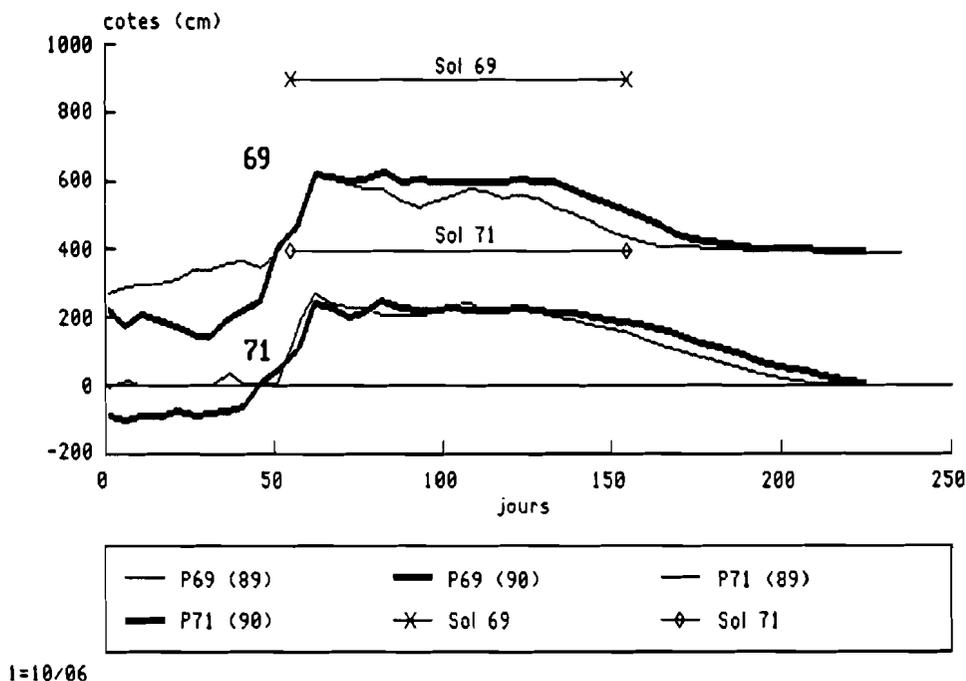
5. Ecoulements souterrains

5.1 Niveaux statiques de la nappe

Pendant les 2 dernières années 89 et 90, un suivi régulier des niveaux de la nappe a été effectué sur 36 tubes piézométriques et 18 puits villageois. En 90, un piézographe a été installé à l'amont du bassin pour suivre avec précision les fluctuations des niveaux de la nappe. En 88, le dispositif ne comprenait que quelques piézomètres dans la partie inondée en amont et en aval de la retenue.

La figure 16 montrent les résultats superposés des cotes mesurées du 10 juin d'une année au 30 janvier de l'année suivante pour deux piézomètres, P69 placé en rive droite à mi-versant et P71 placé en rive gauche en bordure du bas fond. Deux années sont représentées 89-90 et 90-91. On remarque des étiages de nappe beaucoup plus prononcés en juin 90 qu'en juin 89, l'étiage de la nappe de juin 89 fait suite à la pluviométrie un peu excédentaire de 88 (1244 mm) alors que l'étiage de 90 correspond à la pluviométrie un peu faible de 89 (920 mm). On constate également une recharge supérieure, en début d'hivernage 89.

Figure 16 Niveaux statiques de la nappe pour 2 piézomètres



La figure 17 montre les isopièzes tracées en fin de saison sèche (16/06/89) et celles correspondant au niveau le plus haut (3/11/89). Dans les deux situations, on remarque que la nappe du bas-fond est alimentée par l'amont et latéralement par les versants en aval du bassin. Elle s'écoule dans l'axe du marigot.

5.2 Fonctionnement de la nappe

Un transect longitudinal dans l'axe du marigot (fig 18) et trois transects (repérés sur la figure 2) ont été étudiés en 1990 pour comprendre les relations entre la nappe du bas-fond et celle des versants (fig 19).

Le transect longitudinal montre le drainage de la nappe dans l'axe du marigot. Tout en amont, sur le puits 78 équipé d'un piézographe, le niveau du sol se trouve à la cote 14,50 m. La nappe permanente des altérites a entamé une première remontée début juin consécutive à l'épisode pluvieux des 1 et 2 (36,1 + 23,2 = 59,3 mm). Donc, une partie des apports a réussi à rejoindre la nappe phréatique en

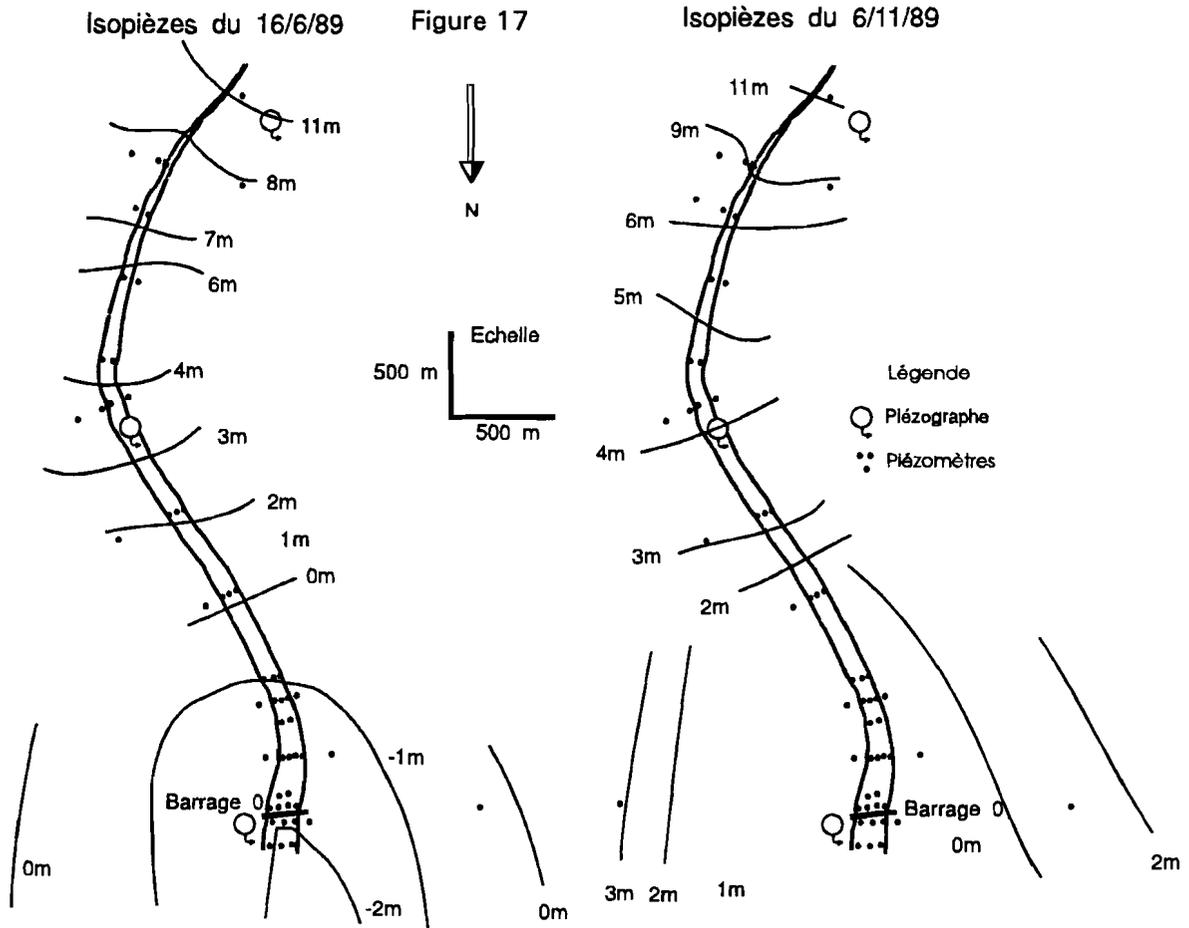
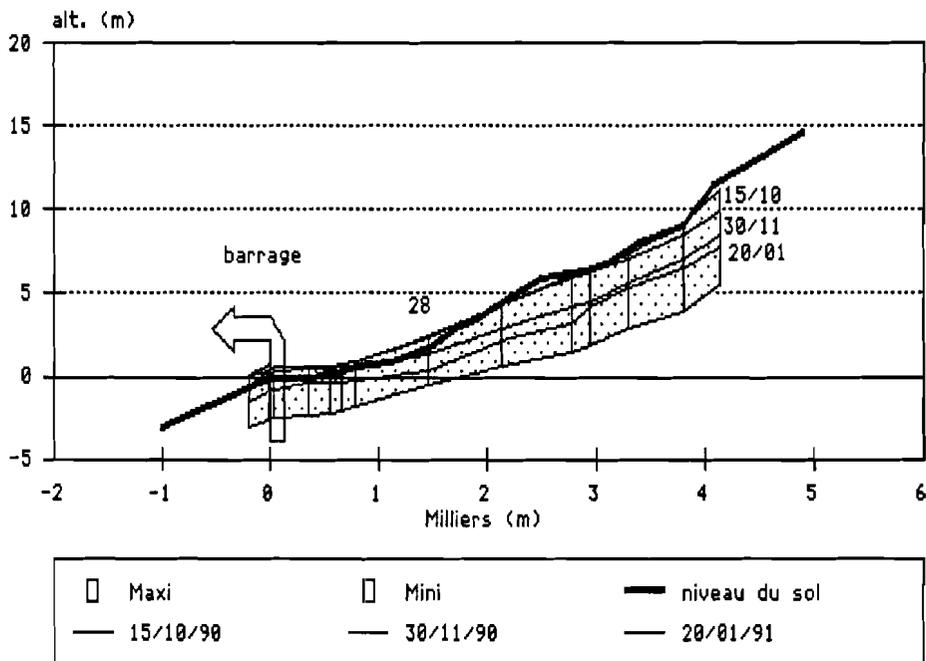
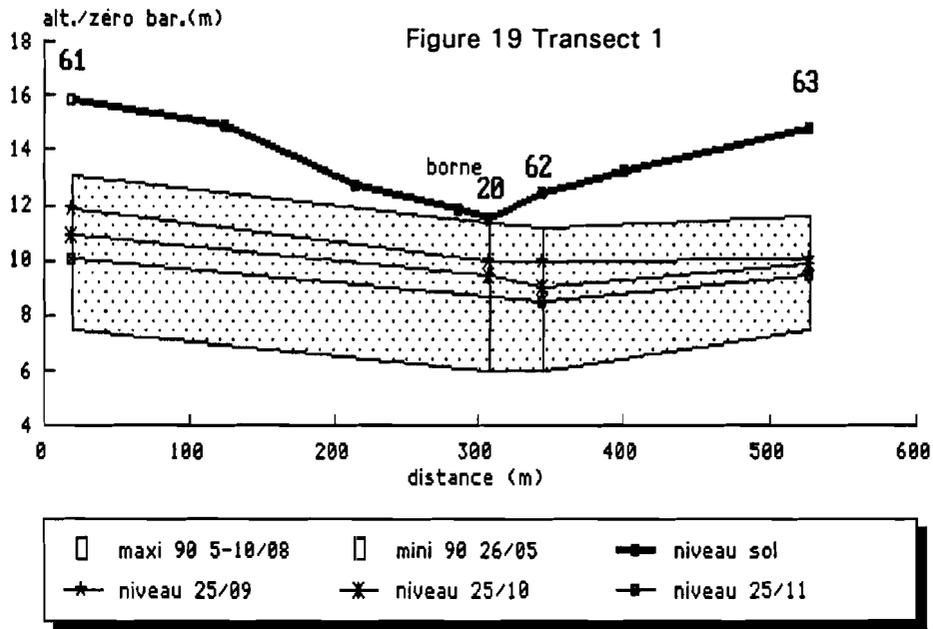


Figure 18

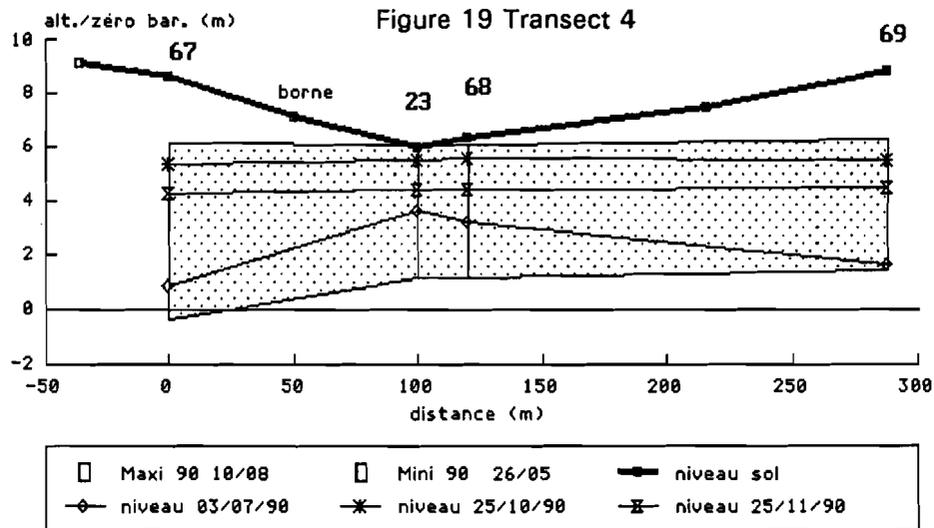
VARIATIONS LONGITUDINALES de la NAPPE
en 1990



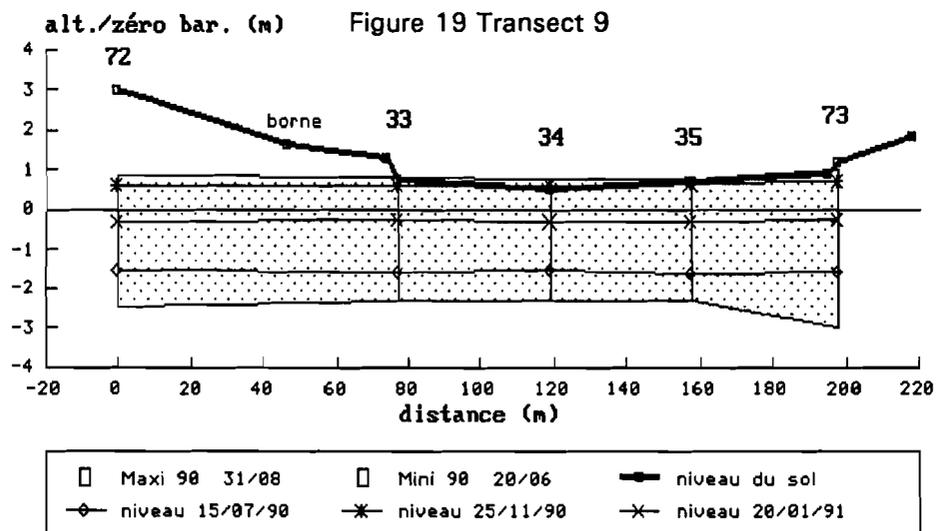
du piézo 20 au piézo 53



à 4139 m du barrage de rive G à rive D



à 2766 m du barrage de rive G à rive D



à 651 m du barrage de rive G à rive D

traversant la tranche de sol non saturée sur une profondeur de 5,50 m. Il faut attendre ensuite la mi-juillet pour retrouver un autre épisode pluvieux de plus de 50 mm (52,3 les 13 et 14/07) capable de faire remonter la nappe. Ensuite, le régime des précipitations a été suffisant pour maintenir la nappe à un niveau voisin de 11,75 m jusqu'à la mi-octobre avec un maximum le 8/08 à 13,03 mètres (54,8 + 26,1 mm les 5 et 7/08). Une baisse régulière de niveau commence début novembre.

On note la remontée bien synchronisée de la nappe sur l'ensemble du bas-fonds d'environ 2 mètres sensiblement aux mêmes dates avec un maximum le même jour le 10/08. Ensuite, pendant deux mois et demi, les niveaux se sont maintenus proche ou au-dessus du sol dans la partie moyenne du bas-fond. Une lame d'eau a pu être maintenue pendant 2 mois à l'amont de la piste KAMBO-KADIOLO et pendant 3 mois à la limite amont de la retenue (transect 9). La descente de la nappe est très liée à la position topographique. A l'amont et au milieu du bas-fond, elle est très rapide (4-5 cm/j) dans la première tranche des 1,50 m.

Dans la partie aval, l'effet du barrage et de sa barrière anti-drainage est très net entre les deux lignes de piézomètres séparées seulement d'une vingtaine de mètres. Le niveau de la nappe remonte beaucoup plus vite à l'amont, même plus rapidement qu'au piézomètre 40 situé 358 m à l'amont. Au tarissement de la nappe, à partir de la cote 0 (25/12/90), la descente à l'amont est très rapide pour rejoindre le niveau aval. Ceci démontre une circulation de l'eau dans les couches perméables profondes.

On remarque également une grande déniveler entre les deux lignes de piézomètres en aval du barrage due à une rupture de pente du terrain 100 m après le barrage. La remontée de la nappe sur la ligne la plus aval, le 15/08 jusqu'à la cote + 3 cm, c'est-à-dire au pied du barrage, correspond à une forte crue de la rivière KADO-BAFINI qui a remonté le bas-fond.

Trois transversales N° 1, 4, 9 ont été particulièrement étudiées. Ces transversales comprennent des piézomètres dans le bas-fond et des puits sur les bords et les versants. Les figures 19 montrent la tranche de sol qui a enregistré le mouvement de la nappe en 90 (partie texturée) avec une cote minimale et une cote maximale. Le minimum correspond au point bas de l'étiage 89-90 et le maximum à la plus forte cote de la saison des pluies 90. Pour les cotes minimum inférieures aux possibilités des tubes piézomètres, on a utilisé les cotes mesurées dans les puits dans ou proche du bas-fond et tenu compte de l'effet de puisage.

Sur le transect n° 1, en amont du bassin, le bas-fond est pratiquement inexistant (20 m de large) et le sol argilo-sableux identique à celui des versants. La dynamique de la nappe suit bien la pente du terrain en toute saison.

Au transect n° 4, au milieu du bassin et juste à l'aval de la piste, les puits 67 et 69 sont exhaurés régulièrement. Le piézomètre 23 descendu profondément permet de mesurer des cotes jusqu'à 4 m du sol. Au vu des mesures, il semble qu'au P23, une petite nappe piégée et perchée dans le sol limono-argileux se maintient aux environs de la cote 300. Le minimum est donné par le puits 68. En début de saison, le ruissellement superficiel provenant surtout de la piste converge vers le bas-fond et alimente la nappe verticalement et latéralement jusqu'à établir un équilibre qui se maintient durant le reste de la saison des pluies.

Le transect aval n° 9 confirme cette constatation, il ne se produit pas de remontée durable de nappe dans le bas-fond tant que la nappe phréatique des versants ne se trouve pas au même niveau. Ensuite, cette nappe d'inféro-flux du bas-fond confondue avec la nappe des versants remonte par paliers liés aux épisodes pluvieux et au cumul pluviométrique.

6. Eléments de régionalisation

Quand on veut étendre les résultats caractérisant le régime hydrologique d'un bassin versant aux bassins voisins d'une même région, la dose d'imprécision s'accroît avec l'influence des facteurs physiques propres à chaque bassin (forme, pente, végétation, perméabilité des sols, réseau hydrographique, degré de mise en culture ect....).

Un recensement des bassins étudiés dans la région (Tab. 13) a été réalisé. Ils ont été classifiés selon la typologie de RODIER & AUVRAY. Ils appartiennent tous au climat tropical de transition. A partir de leurs caractéristiques hydrologiques, des méthodes d'estimation de la ressource en eau et du risque

de crue sont proposées pour aider l'ingénieur dans l'établissement de caractéristiques de projets d'aménagement. Il sera intéressant d'inclure dans ces résultats les observations réalisées dans le projet COMOE qui se situe dans la même zone écologique.

Tableau 13: Bassins Versants Etudiés dans la même région

BASSIN	Pan. mm	Rivière	Surface Km²	KC	IG	Classe de relief	Classe de perméabilité
KAMBO	1100	KADO	10	1.42	2.8	R2	P3-P4
LOULOUNI	1100	KOBAFINI	800	1.23	9.3	R2	P3
BANAKORO	1100	FARAKO	68	1.25	10.6	R3	P3
FLAKOHO	1300	BANDAMA	30	1.17	8.7	R3	P3
WOROSSANTIAKA	1300	BANDAMA	12	1.21	6.9	R3	P3-P4
NAMBONKAHA	1300	BANDAMA	47.6	1.38	5.3	R2	P3-P4
ZANIENA	1200	DEKOROBOU	764	1.27	7.3	R2	P3-P4
BOWARA	1200	KOBI	270	1.48	9.1	R2	P3-P4
LOBOUALA	1200	DIAN	155	1.35	12	R3-R4	P3-P4
KRINA	1200	BARARO	251	1.15	13.4	R3-R4	P3-P4
TENAYA	1200	BARARO	39	1.1	7.4	R2-R3	P3-P4
MADINA	1200	DJITIKO	103	1.19	16.7	R4	P3-P4

Pan = Pluie moyenne annuelle à un poste de référence

Kc = indice de Compacité

IG = Indice globale de pente en m/km

Les classes de relief et de perméabilité suivent la typologie des bassins selon RODIER & AUVRAY

KAMBO est le bassin étudié dans ce projet, LOULOUNI, BANAKORO et FLAKOHO ont été étudiés une première fois par BRUNET-MORET et DUBREUIL en 1959, ils sont repris dans une étude plus récente de LAMAGAT (1972). Les études des bassins de FLAKOHO, WOROSSANTIAKA & NAMBONKAHA ont été publiées par DUBREUIL en 1960. Les autres bassins de la région de SIKASSO ont été suivis par le service HYDROLOGIQUE du MALI, une synthèse de ces observations a été publiée par LAMAGAT en 1972.

6.1 Régionalisation de la crue d'étude.

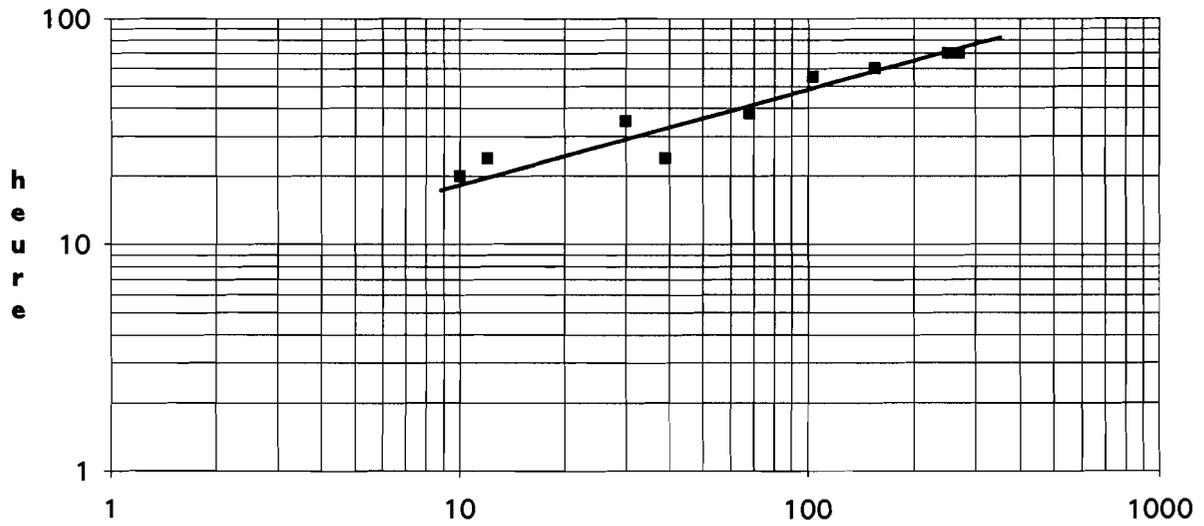
Il a été possible de présenter, à partir des données disponibles, les caractéristiques moyennes les plus probables de la crue d'étude dans la région sud de SIKASSO pour des bassins versants de 10 à 300 km². Elles sont réunies dans les graphes 20 à coordonnées logarithmiques :

- Temps de base du ruissellement
- Volume ruisselé
- Débits spécifiques du maximum de la crue

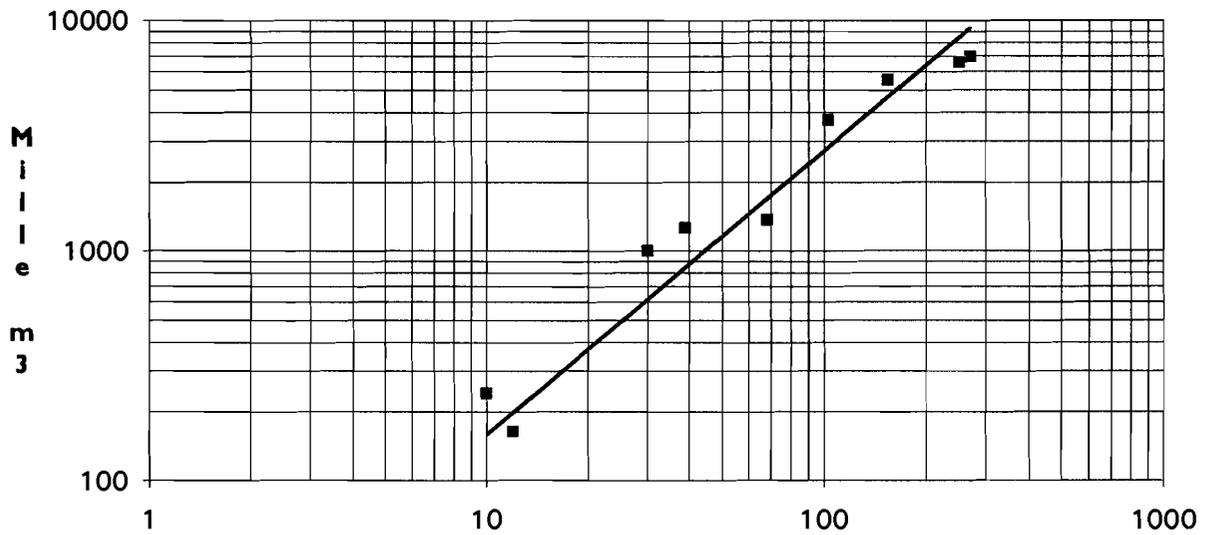
La crue d'étude peut donc, être entièrement précisée par ces trois droites en fonction de la surface du bassin. Bien entendu, ces droites représentent des moyennes susceptibles de modifications non négligeables si l'un quelconque des facteurs physiques d'un bassin offrait un aspect très particulier. On remarquera que le caractère très allongé du bassin de KAMBO donne un point hors de la droite pour l'estimation du débit maximum.

Figure 20 : Caractéristiques de la crue d'étude dans la région de SIKASSO

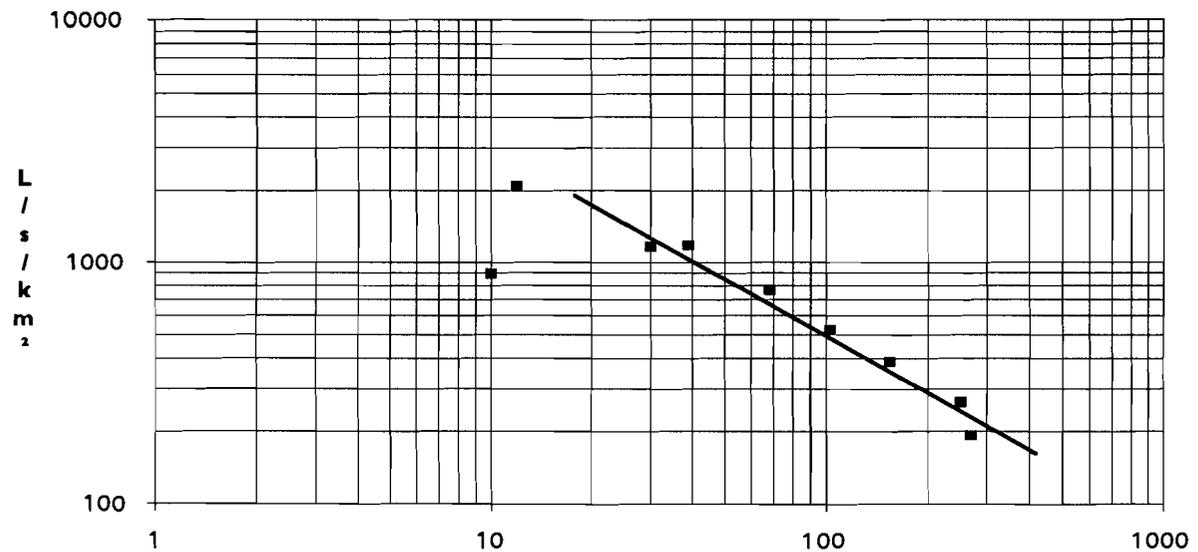
Temps de base



Volume ruisselé



Débit spécifique du maximum de crue



6.2 Régionalisation de la ressource en eau annuelle

La détermination des apports annuels que l'on peut espérer d'un bassin dépend de la hauteur annuelle des précipitations, de la part d'eau reprise par l'évaporation et du stockage inter-annuel dans les réserves aquifères. Une première tentative par analyse de régression multiple entre la pluie annuelle, l'ETP et les écoulements observés sur l'ensemble des bassins n'a pas abouti à des résultats très satisfaisants. Dans son étude des bassins de SIKASSO, LAMAGAT devait exclure l'année 1959 pour obtenir une régression acceptable entre la pluie moyenne et la lame écoulée. Les observations actuelles ne concordent pas avec cette dernière régression.

La régression obtenue sur des observations des années 70 par LAMAGAT sur l'ensemble des bassins suivis dans la région a pour expression :

$$Lr = 0.240(P_{moy} - 625)$$

$$\begin{aligned} Lr &= \text{lame écoulée en mm} \\ P_{moy} &= \text{Pluie moyenne en mm} \end{aligned}$$

A partir de cette régression on obtiendrait pour KAMBO une lame de 149 mm en 88 (contre 63mm observés) , de 71 mm en 89 (contre 33 mm observés) et de 115 mm en 90 (contre 35 mm observés).

La seconde tentative a été de tester la méthode d'estimation de l'écoulement moyen annuel proposée par DUBREUIL et VUILLAUME en 1975 à cet échantillon de bassins versants et de comparer cette estimation à celle obtenue à partir des observations.

A partir d'un échantillon de 52 bassins répartis entre de nombreux pays : MALI, COTE D'IVOIRE, BURKINA FASO, TOGO, BENIN, CAMEROUN, CENTRE AFRIQUE, MADAGASCAR et RWANDA, DUBREUIL & VUILLAUME propose l'équation d'estimation suivante pour les bassins de savane boisée avec une pluviosité moyenne inscrite entre 900 et 1800 mm :

$$Ec = 0.47 Pr + 1.5 C + (a Ds + b) + A$$

- Ec = l'écoulement annuel en mm du bassin
- Pr représente la part disponible pour l'écoulement de l'apport pluvial , la part non disponible étant sensée être représentée par l'évapotranspiration. $Pr = P_{an} - ETP / 3$ P_{an} étant la pluie annuelle en mm et ETP, l'évapotranspiration potentielle en mm.
- C est le pourcentage de sol cultivé dans le bassin. Lorsque l'information n'était pas donné dans le rapport concernant le bassin, C a été estimée à partir des cartes au 1/200 000 de l'IGN qui s'appuyent sur des photos aériennes des années 50. Ce terme permet une correction sur l'évaluation de l'évapotranspiration. Ici, un défrichage de 10 % de la superficie du bassin (suppression d'un couvert végétal dense pour le remplacer par des cultures temporaires peu couvrantes) augmentent l'écoulement de 15 mm.
- Ds est la dénivelée spécifique, c'est le produit de l'indice global de pente (m/km²) par la racine carrée de la surface et s'exprime en m.
- a et b sont des constantes d'ajustement
- A représente la part due à l'aptitude de types de bassins numérotés de 1 à 4 et déterminée à partir d'une matrice de correspondance entre surfaces et potentialité d'écoulement. Dans cette note les auteurs donnent les valeurs suivantes à A : A = -75 mm pour les bassins dont la surface drainée est supérieure à 25 km², A = 50 mm si la surface drainée est comprise entre 5 et 25 km². Par essais successifs, nous avons cherché à caler au mieux ce terme et nous avons obtenu A = -75 mm pour les bassins dont la surface drainée est comprise entre 10 et 100 km² et A = -175 mm pour les plus grands.

Cette étude portait sur les bassins versants de 10 à 100 km², mais de l'avis des auteurs elle peut être étendue à l'intervalle 1 à 1000 km². Le tableau 14 consigne les valeurs estimées par cette méthode pour les bassins choisis et compare ces estimations à celles obtenues à partir des observations (nous avons conservé celles des auteurs des études, régression linéaire entre pluie et lame écoulée à l'échelle annuelle, modèle de simulation à l'échelle journalière, ajustement statistique sur les lames écoulées ...).

On remarquera que ces estimations respectent l'ordre de grandeur et peuvent suffire à un avant projet de dimensionnement d'ouvrage.

Tableau 14 : Régionalisation du paramètre écoulement moyen annuel

	pluvio mm	super- ficie km ²	IG m/km	C %	Pr mm	Ds m	A mm	Ec mm	Ec obser mm
KAMBO	1100	10	2.8	66	483.3	8.9	-75.0	87	84
LOULOUNI	1100	800	9.3	5	483.3	263.0	-175.0	200	112
BANAKORO	1100	68	10.6	30	483.3	87.4	-75.0	127	114
FLAKOHO	1300	30	8.7	20	683.3	47.7	-75.0	158	129
WOROSSANTIKA	1300	12	6.9	11	683.3	23.9	-75.0	116	129
NAMBONKAHA	1300	47.6	5.3	6	683.3	36.6	-75.0	130	
ZANIENA	1200	764	7.3	10	583.3	201.8	-175.0	181	159
BOWARA	1200	270	9.1	10	583.3	149.5	-175.0	119	138
LOBOUALA	1200	155	12.0	10	583.3	149.4	-175.0	118	138
KRINA	1200	251	13.4	10	583.3	212.3	-175.0	194	97
TENAYA	1200	39	7.4	30	583.3	46.2	-75.0	125	129
MADINA	1200	103	16.7	10	583.3	169.5	-175.0	143	142

IG = Indice global de pente

C = % de surface cultivée

Pr = Fraction pluviométrique utile à l'écoulement

Ds = Dénivelée spécifique

A = Aptitude du bassin à l'écoulement

Ec = lame écoulée calculée par la méthode DUBREUIL & VUILLAUME

Ec obser = lame écoulée estimée pour la pluviométrie de référence à partir des observations de débits

CONCLUSIONS

Le dispositif de mesures sur le terrain a été suivi entre 88 & 90. L'année 90 est égale à la médiane du secteur (poste météo de KADIOLO), l'année 88 est légèrement inférieure à une récurrence de 5 ans en année humide et 89 proche de la récurrence 5 ans en année sèche. Il n'a malheureusement pas été observé d'événements exceptionnels.

Le volet hydrologique a été réalisé en étroite relation avec l'agronomie. Il a atteint pleinement les deux objectifs qui lui étaient assignés. Le bilan hydrologique du bas-fond de KAMBO a été observé pendant 3 années. Ces observations ont permis de caler un modèle conceptuel "pluie - débit" et de simuler une chronique de la ressource en eau. Cette chronique a pu être traduite en stock d'eau disponible pour la riziculture dans les deux cas de figures : bas-fond aménagé et bas-fond non aménagé. Les données hydrologiques récentes de KAMBO et celles, plus anciennes, de bassins observés dans la région ont permis de proposer des méthodes simples pour estimer les valeurs caractéristiques de l'écoulement dans les bas-fonds de la région de SIKASSO. Nous rappellerons brièvement les principaux résultats du volet hydrologique dans cette conclusion et indiquerons quelques perspectives de recherche.

Les mesures pluviométriques ont montré une hétérogénéité des averses sur ce type de bassin de forme allongée.

Les résultats d'évaporation sur bac mixte (flottant et hors-sol) donnent des données contrastées, inférieures à l'ETP quand le bac est flottant et supérieur en saison sèche quand il est dégagé au-dessus du sol. Les comparaisons devraient être faites avec un bac COLORADO classique enterré dans un espace

dégagé. Le bilan offre-demande en eau (P - ETP) est positif seulement 4 mois par an en moyenne. Une poursuite de ces observations permettrait une estimation plus fine de l'évaporation réelle. Cela améliorerait la modélisation du bilan en eau.

Sur ce bassin équipé de petits aménagements en cascade, les 3 campagnes ont démontré qu'il est difficile de départager les ruissellements de crues des écoulements de base de la nappe. Dans les écoulements très retardés, les écoulements hypodermiques se confondent avec les apports de la nappe. Pour améliorer la précision des mesures de hauteurs d'eau, effectuées sur un seuil très large (digue déversante), il est nécessaire d'approcher le millimètre. Pour reconstituer la crue qui arrive dans une petite retenue et apprécier son effet sur l'amortissement et le laminage des débits maximum, il faut pouvoir disposer d'un pas de temps précis et réduit (de l'ordre de 5 mn). Ces exigences de précision peuvent être obtenues par les derniers capteurs électroniques récemment mis au point (sonde piézorésistive et carte d'acquisition).

Les bilans hydrologiques établis ont montré la part très faible de tous les écoulements superficiels confondus. Les lames écoulées correspondent à 5% des apports pluviométriques en 88 et à un peu plus de 3% en 89 et 90. La part de ruissellement (ou écoulement rapide de crue) se situe entre le tiers et le quart des écoulements en année moyenne mais augmente sérieusement en année humide (43% en 88). L'écoulement de base permanent ne s'observe qu'à la station aval. Il démarre vers la mi-août quand la nappe est engorgée et le barrage en eau. Il se maintient jusqu'à la mi-novembre en année moyenne.

La capacité du barrage est faible (27 000 m³), cela représente une lame d'eau de moins de 3 mm sur le bassin. Les écoulements de surface mesurés à l'exutoire représentent 23 fois la capacité de la retenue en 88, 12 fois en 89 et 13 fois en 90. Le seuil pluviométrique inférieur pour amener durablement la nappe affleurante dans la partie aval du bas-fond se situe aux environs de 500 mm sur les 3 ans observés. Le barrage, bien situé à l'aval avant la rupture de pente, bénéficie du dépôt des éléments fins et autorise le contrôle des lames d'eau sur 500 m (6 ha de parcelles). Il sécurise la riziculture lors de creux pluviométriques et prolonge un régime d'inondation en fin de cycle. Les barrières secondaires, étagées à l'amont, freinent les écoulements et maintiennent la recharge de la nappe à leurs niveaux.

P. PARIENTE (1990) a simulé les coefficients de satisfaction en eau de la riziculture avec ou sans aménagement (barrage). Le seuil inférieur de satisfaction (80%) n'est pas atteint seulement 5 années sur 25 (1963-87) avec aménagement, et 14 sur 25 sans aménagement. L'efficacité du barrage est optimale pour les années moyennement déficitaires.

Le stockage souterrain sur les versants joue un rôle essentiel dans le fonctionnement hydrologique du bas-fond. La nappe du bas-fond est indissociable de la nappe des altérites des versants, même si en début de saison des pluies, les ruissellements superficiels maintiennent localement une nappe dans le bas-fond, celle-ci disparaît rapidement par infiltration verticale. Le barrage stoppe bien l'écoulement longitudinale de la nappe.

La régionalisation des résultats de l'étude hydrologique a utilisé les données de KAMBO et d'un certain nombre de bassins étudiés. Cette étude devrait être affinée en prenant en compte les résultats des études hydrologiques des bas-fonds de la COMOE. Les méthodes de prédétermination sont basées sur une reconnaissance minutieuse de la physiographie des bassins. La télédétection est l'outil idéal pour la quantification des critères physiographiques. Pour des raisons de calendrier, et d'éloignement des équipes, la symbiose qui a existé entre le volet "hydrologie" le volet "agronomie" n'a pas pu se faire avec le volet télédétection. On espère que des recherches sur ce thème de la régionalisation puissent se poursuivre, mais que déjà dans la synthèse générale, les résultats du volet télédétection qui s'est intéressé à la zone de SIKASSO et de la COMOE permettent de dégager les outils utiles à la prédétermination des crues et de l'écoulement.

BIBLIOGRAPHIE

AFVP (1987) Programme de micro-réalisation M.R. KADIOLO, rapport technique de l'aménagement du bas-fond de KAMBO

ALBERGEL J. (1988) Fonctionnement hydrologique des bas-fonds - Synthèse préliminaire. Programme CEE/CIRAD, n° TS2A 0017 F CD, ISRA CIRAD, ORSTOM

ALBERGEL J. MONTOROI J.P. (1988) Rapport de mission au BURKINA FASO et au MALI du 25 Avril au 7 MAI 1988 Programme CEE/CIRAD, n° TS2A 0017 F CD, ISRA CIRAD, ORSTOM

ALBERGEL J. (1989) Rapport de mission a OUAGADOUGOU, BAMAKO & SIKASSO 13 au 24 Février 1989 Programme CEE/CIRAD, n° TS2A 0017 F CD, ISRA CIRAD, ORSTOM

BERTON S. (1988) La maîtrise des crues dans les bas-fonds; Petits et micro-barrage en Afrique de l'Ouest Dossier n°12, GRET, COOP. F, AFVP, ACCT, 02/88

BRUNET MORET Y. (1969) Etude des lois statistiques utilisées en "hydrologie" Cah. ORSTOM ser. hydro, vol 1-2-3

CHEVALIER, (1990) Complexité hydrologique du petit bassin versant, Exemple en savane humide, BOORO-BOROTOU (C.I.) Thèse, ORSTOM, USTL, MONTPELLIER Edition de l'ORSTOM, Collection Etudes et thèses

DUBREUIL P. VUILLAUME G. (1975) Influence du milieu Physico-Climatique sur l'Ecoulement des Petits Bassins Intertropicaux Symposium AISH Tokyo, Dec. 75, in Les caractéristiques des bassins fluviaux, publication AISH N° 117

DUBREUIL P. BRUNET Y (1960) Aménagement de la plaine de LOULOUNI (Région de SIKASSO). Etude Hydrologique du KOBAFINI. ORSTOM, Ministère de l'Agriculture, Service du Génie Rurale

DUBREUIL P. (1972) Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. ORSTOM, PARIS

EDITJANO, MICHEL C. (1989). Un modèle pluie débit à trois paramètres. Houille blanche N°2, 1989, 114-121

GUIGUEN N. (1990) Bassin versant de KAMBO/région de KADIOLO au MALI - rapport de tournée du 06 au 12 mai 1990. programme bas-fond. ORSTOM, IER, CIRAD R3S

GUIGUEN N. (1990) Bassin versant de KAMBO/région de KADIOLO au MALI - rapport de tournée juin 1990. programme bas-fond. ORSTOM, IER, CIRAD R3S

GUIGUEN N., PARIENTE (1990) Bassin versant de KAMBO/région de KADIOLO au MALI - rapport de tournée juillet 1990. programme bas-fond. ORSTOM, IER, CIRAD R3S

GUIGUEN N. (1990), Bassin versant de KAMBO, région de KADIOLO (MALI), Rapport de campagne 1989, Synthèse des observations 1989-1989-1990 ORSTOM, IER, CIRAD R3S

IER-CIRAD (1990), Mise en valeur des bas-fonds, projet eau-sol-plante, Campagne 89-90, BAMAKO 03/90

LAMAGAT J.P. (1979) Région de SIKASSO, Le KOBAFINI à LOULOUNI, débits journaliers, apports annuels, crue de projet, ORSTOM BAMAKO,

LAMAGAT J.P. (1980) Région Sud du MALI. Bilan des observations hydrologiques, débits spécifiques décennaux, le DIAN à LOBOUALA, ORSTOM BAMAKO

NASH J.E. SUTCLIFE J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, 1 , A discussion of principles, J. Hydrol., 10 pp 282-290

OLIVRY J.C (1986), Méthode de prédétermination des crues sur petits BV, l'exemple du CAMEROUN, ORSTOM

PARIENTE P. (1990), BV de KAMBO, synthèse des observations hydrologiques 88-90 Propositions d'une approche agro-hydraulique, Programme mise en valeur des bas-fonds, Réseau R3S ENGREF, IRAT-CIRAD, IER, DRA, SRCVO, 12/90 Mastère Spécialisé en maîtrise de l'eau pour le développement Montpellier

PEPIN Y (1989), Bassin versant de KAMBO, région de KADIOLO (MALI), Synthèse des observations 88-89, Programme bas-fond ORSTOM, IER-CIRAD, DAKAR 12/89

PEPIN Y. (1989) Bassin versant de KAMBO/région de KADIOLO au MALI - rapport de mission juin 1989. programme bas-fond. ORSTOM, IER, CIRAD R3S

PEPIN Y. PARIENTE (1990) Bassin versant de KAMBO/région de KADIOLO au MALI - rapport de mission août 1990. programme bas-fond. ORSTOM, IER, CIRAD R3S

RIBSTEIN P. (1989) Modèles de crues et petits bassins versants au SAHEL. Thèse ORSTOM, USTL, Edition de l'ORSTOM Collection Etudes et Thèses

RODIER J, AUVRAY C, (1965) Estimation des débits de crues décennales pour BV inférieurs à 200 km², note technique de l'ORSTOM

VAKSMAN (1990) Modèle BIPODE, notice d'utilisation, IRAT, CIRAD