Bas-fonds et riziculture

CIRAD

ORSTOM

Actes
du séminaire
d'Antananarivo
Madagascar
9-14 décembre
1991

Bas-fonds et riziculture
Antananarivo, 9-14 décembre 1991
CIRAD, 1993

Contraintes du milieu naturel et intérêt de l'aménagement des bas-fonds : cas du sud du Mali

B. LIDON [1], M. SIMPARA [2]

Résumé — Au cours des années 70, un certain nombre d'aménagements de bas-fonds ont été réalisés dans le sud du Mali. Il s'agissait d'améliorer la riziculture traditionnelle. Vingt ans après, malgré la surface relativement faible de ces aménagements (pour la plupart inférieurs à 300 ha), leur simplicité, la préexistence d'une mise en valeur paysanne, ils sont pour la plupart sous-utilisés et les infrastructures largement dégradées. Face à l'intérêt que représentent le développement d'une riziculture à faible coût et la possibilité de développer le maraîchage et les cultures fruitières dans les bas-fonds, l'IER et l'IRAT ont entrepris depuis six ans un programme de recherche sur « l'amélioration de la mise en valeur des bas-fonds dans la région de Sikasso ». Trois bas-fonds ont été étudiés et leur mise en valeur (dans le cadre d'aménagements ou sans) suivie. La superficie des bassins versants des sites étudiés varie de 10 à 2 200 km². Chaque site a fait l'objet d'une caractérisation hydrologique et agrohydraulique. Deux types d'aménagements y ont été étudiés : type digue déversante sur les petits bassins versants et barrage à batardeaux avec aménagement de type secondaire sur les plaines inondables. Les résultats des travaux montrent que les difficultés de mise en valeur sont largement expliquées par la non-prise en compte des facteurs caractéristiques du fonctionnement des bas-fonds (risque, hydrologique, dynamique de la nappe, perméabilité des sol...) et par les limites qu'ils imposent à l'intensification des cultures. Il faut reconnaître que ce n'est que de façon très partielle que les concepteurs peuvent actuellement, avec les outils à leur disposition et les budgets disponibles pour les études, réaliser les études de factibilité. L'expérience acquise montre que seul le recours à une recherche opérationnelle, mise en œuvre sur des aménagements expérimentaux réalisés en milieu paysan, permettra d'intégrer les résultats des recherches pluridisciplinaires et de proposer une méthodologie de conception, gestion et mise en valeur des zones inondables.

Mots-clés : bas-fond, hydrologie, morphopédologie, génie rural, riziculture.

Introduction

En Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, et particulièrement au Mali, face aux nombreux échecs rencontrés dans l'aménagement des bas-fonds, une vive polémique s'est engagée sur le bien-fondé et le véritable impact hydraulique des aménagements proposés pour améliorer la maîtrise de l'eau dans les bas fonds.

Cette communication a pour objectif de présenter une méthode originale développée dans le cadre du suivi d'un petit aménagement de bas-fond réalisé dans la zone sud du Mali et de proposer le développement d'une méthode de diagnostic rapide permettant aux organismes chargés d'étudier les aménagements d'évaluer ex ante l'intérêt technique des solutions proposées.

Ces travaux de recherche ont été effectués dans le cadre du projet « Eau-sol-plante » (IER-CIRAD) sur financement FAC et CEE (réseau R3S). Outre l'équipe IER-CIRAD, l'ORSTOM, l'IER-DRSPR (enquêtes socio-économiques) et l'ENGREF ont participé à ces travaux.

La mise en valeur des bas-fonds dans le sud du Mali (cercles de Sikasso et de Kadiolo)

La mise en valeur traditionnelle

La zone d'étude a un climat de type soudanien avec une pluviométrie moyenne allant de 900 à 1 100 mm (figure 1). Le système de production de la région est essentiellennent axé sur le coton et sur les céréales. La riziculture n'y occupe qu'une place marginale et elle est essentiellement pratiquée par les femmes (tableau I).

[1] CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France.
[2] IER, BP 1769 Bamako, Mali.

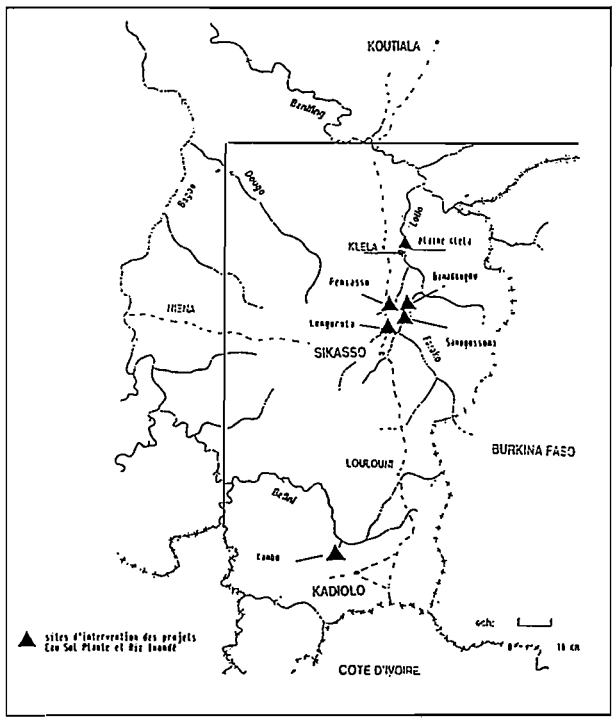


Figure 1. La zone d'étude : les cercles de Sikasso et Kadiolo.

Les zones rizicultivables (GADELLE, 1989) représentent néanmoins un potentiel important. Il est estimé à 200 000 ha répartis comme suit : 15 % de cuvettes et petits bas-fonds ; 32 % de plaines moyennes, 53 % de plaines de grands cours d'eau.

Les activités liées au bas-fond sont en fait beaucoup plus importantes que ne le laissent supposer les chiffres des statistiques agricoles. La riziculture représente la majeure partie des champs privés des femmes et, par là-même, un enjeu important du développement (DRSPR, 1991). Le tableau II illustre le temps consacré par les femmes des deux principales ethnies de la zone à la riziculture et aux cultures maraîchères. Ces pourcentages d'emploi du temps sont à relativiser en fonction de l'âge des rizicultrices (les femmes âgees sont dispensées des travaux sur les champs communs) et de la période de l'année (désherbage et récolte sur les champs communs).

Les rendements obtenus en riziculture traditionnelle restent relativement faibles (pas d'intrants, enherbement important, pas de maîtrise de l'eau). Le tableau III rapporte des résultats d'enquête en milieu paysan.

Particulièrement dans les plaines de moyenne importance, il existe un véritable système de culture « bas-fond » défini par les paysans en fonction des contraintes de sol et du risque hydraulique. Les plantes à tubercules (patate douce, manioc, pomme de terre, igname) et l'arboriculture y représentent un enjeu tout aussi important que la riziculture (tableau IV).

Tableau II. Pourcentage de l'emploi du temps des femmes consacré à la riziculture.

	Senoufou		Bambara	
	Jeunes	Agées	Jeunes	Agées
Travaux agricoles				
Champs communs	28	-	-	-
Riziculture	8	70	32	65
Maraîchage	2	2	4	4
Travaux ménagers	49	16	50	17
Divers	12	12	14	14

Tableau III. Résultats d'enquête de rendement (en kg ha^{-1}).

	Samogossoni 1988 21 parcelles	Peniasso 1991 16 parcelles
Rendement moyen	1 164	990
Ecart-type	608	757

Les aménagements

Mis à part les crues précoces dues à des phénomènes de ruissellement, les écoulements permanents ne se déclenchent que lorsque le cumul pluviométrique est de l'ordre de 500 à 600 mm (ALBERGEL *et al.*, 1991 ; LAMACHERE, 1984 ; LAMAGAT, 1980).

Le tableau V illustre ce phénomène sur un bas fond suivi dans la zone.

Tableau I. Répartition (en %) des productions agricoles (source : CMDT).

Arrondissement	Coton	Maïs	Mil	Sorgho	Association maïs-mil	Riz	Autres cultures
Kignan	34	11	10	32	8	4	1
Klela	23	15	7	22	18	12	3
Niena	29	19	9	18	17	5	3
Sikasso	15	12	7	13	10	6	37
Kadiolo	25	16	14	19	17	5	4

Tableau IV. Répartition des cultures dans le bas-fond de Peniasso (saison des pluies) (source : projet « Eau-sol-plante »).

Culture	Surface	Pourcentage
Riz	70	45
Patate douce	37	25
Cultures associées (maïs, arachide, taro)	9	6
Manioc	8	5,5
Arboriculture	6	4,5
Jachère pour pomme de terre	4	2,5
Zone non cultivée	4,5	3,5
Lit mineur du marigot	7,5	5
Total	146	100

Afin que le riz puisse supporter ou s'adapter à la présence d'une lame d'eau, la riziculture est démarrée en pluvial et inondée lors de l'apparition des crues 30 à 45 jours après son semis suivant l'année pluviométrique, le type de bas fond et la place de la parcelle dans ce bas-fond (KRIER et SIMPARA, 1990 *a, b, c* ; LIDON, 1987 ; LIDON et SIMPARA, 1988 ; LIDON *et al.*, 1988, 1989 ; ALBERGEL, 1989 ; LAMACHERE, 1984 ; LAMAGAT, 1979).

Ce système permet de satisfaire, grâce à l'épandage des crues, les besoins en eau du riz en période critique et jusqu'en fin de cycle (figure 2). Une telle technique induit des risques hydrauliques importants : pluies insuffisantes ou excessives pour permettre la préparation du sol et/ou la levée des semis ; crue trop précoce ou trop importante noyant le riz ; crue trop tardive ne relayant pas les pluies assez tôt, entraînant un dessèchement de la culture ; décrue trop précoce ayant les mêmes résultats.

Pour obtenir un minimum de maîtrise de l'eau, la CMDT (Compagnie malienne des textiles) a réalisé, à partir des années 70, un certain nombre d'aménagements de bas-fonds (tableau VI), essentiellement sur des plaines de moyenne importance.

Le principal type d'aménagement (petits périmètres FED) est composé d'un barrage de dérivation et de réseaux sommaires d'irrigation devant permettre l'épandage de la crue et assurer une submersion plus uniforme des parcelles (figure 3). Dans la pratique, ces aménagements se sont révélés moins performants que prévu.

Outre les difficultés d'ordre organisationnel (remembrement, insertion de la riziculture dans le système de production), leur mise en valeur s'est heurtée à des problèmes agronomiques et de gestion de l'eau non résolus par ce type d'aménagement. Les études menées par le projet Eau-sol-plante montrent que :

– la maîtrise de la lame d'eau est illusoire sur les sols de bas-fond : pour maintenir une lame d'eau, il faut (suivant la place de la parcelle dans la toposéquence) une qualité d'eau représentant trois à neuf fois les seuls besoins de la culture (KRIER et SAMPARA, 1990 *a, b, c* ; LIDON *et al.*, 1988, 1989) ; ces constatations sont explicables par les très fortes perméabilités de ces sols (perméabilités horizontales de l'ordre de 10^{-3} m s^{-1}, perméabilités verticales de l'ordre de 10^{-4} m s^{-1} ;

– maîtriser l'eau nécessite de concevoir des aménagements ou une gestion de l'eau permettant de maîriser la nappe (KRIER et SAMPARA, 1990 *c* ; LIDON *et al.*, 1989) ;

– la mauvaise maîtrise de l'eau sur les aménagements du type FED (battements de nappe, drainage intense) limite de façon importante les possibilités d'intensification : les rendements moyens obtenus en 1988 sur 35 parcelles en milieu paysan, avec maîtrise de l'eau permise par l'aménagement et fumure vulgarisée (LIDON *et al.*, 1989) n'ont été que de 2 100 kg ha^{-1} (écart-type : 851 kg ha^{-1}).

Sur les sites non aménagés, où la nappe est régulée, du fait de conditions naturelles favorables, comme la présence d'un verrou naturel en aval, les rendements obtenus sont meilleurs et l'intensification devient intéressante (KRIER et SAMPARA, 1990 *a, b* ; LIDON *et al.*, 1989). Les rendements obtenus en 1988 sur 6 parcelles paysannes dans ces conditions de milieu, sans aménagement et avec une fumure vulgarisée l'illustrent : rendement moyen : 2 646 kg ha^{-1} ;

Tableau V. Apparition des écoulements dans les bas-fonds en fonction de la pluviométrie (mm). Bas-fond de Peniasso (bassin versant : 120 km^2), 1991 (source : projet « Eau-sol-plante »).

Mois	Pluies mensuelles	Pluies cumulées	Ecoulement		
			Ruissellement	Différé	Total
Mai	100	174	0	0	0
Juin	200	374	20	0	20
Juillet	185	559	6	9	15
Août	390	949	35	18	53
Septembre	172	1 121	5	16	21
Octobre	117	1 238	5	19	24
Novembre	27	1 265	0	5	5

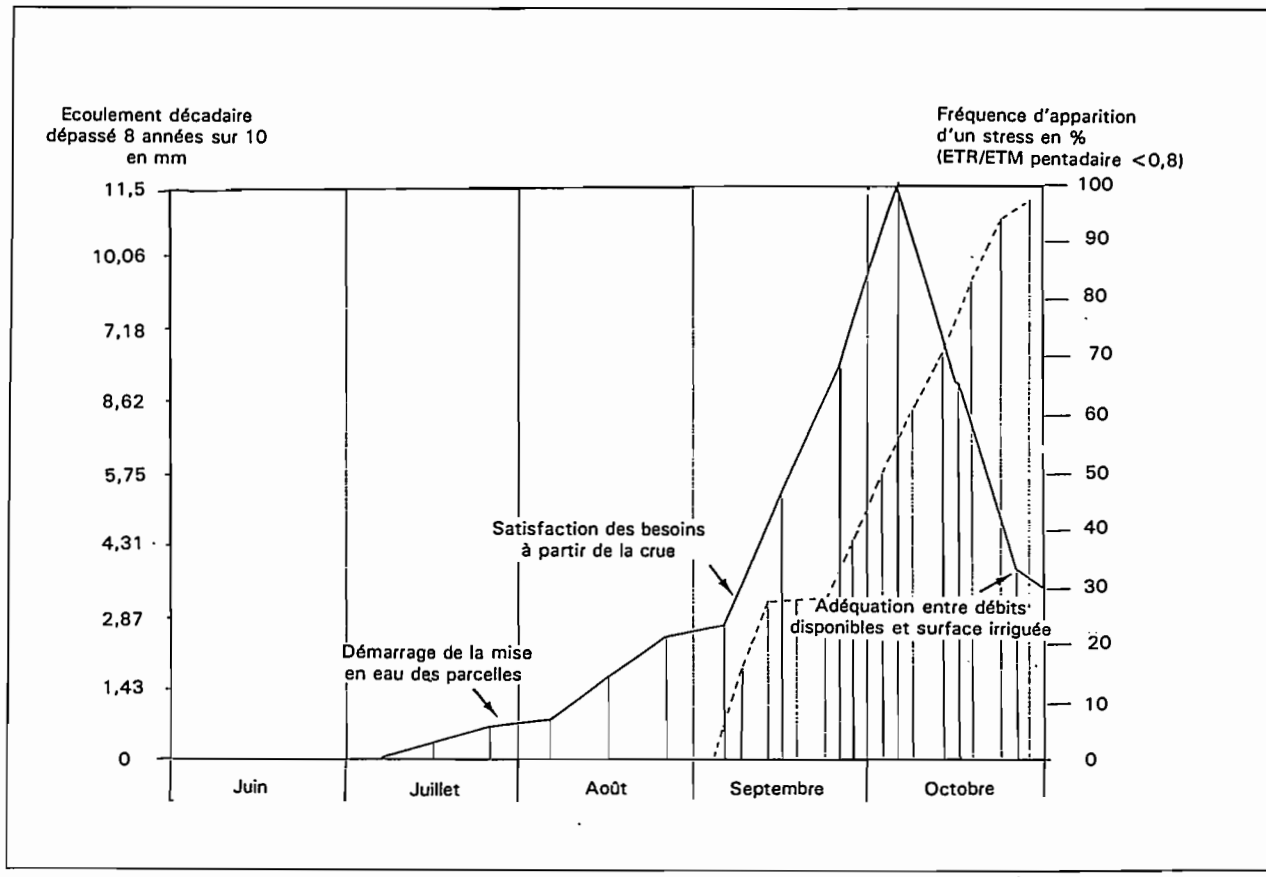


Figure 2. Comparaison mensuelle à Kléla des taux de satisfaction du riz en pluvial et des écoulements du Lotio dépassés 8 années sur 10.

Tableau VI. Liste des aménagements de bas-fonds étudiés ou réalisés par la CMDT dans la zone dépendant de la Direction régionale de Sikasso (source : CMDT).

Site	Superficie (ha)	Type d'intervention			Année de réalisation	Financement	Montant (milliers FCFA)
		Etudes	Ouvrages d'art	Aménagement			
Kjela	1 200	X	X	X	1975-79	FED	536 224
Touroumadié	90	X	X	X	1974-82-83	FED	17 475
Doumanaba	190	X	X	X	1958-82-83	FED	16 209
Samogossoni	180	X	X	X	1977-82-83	FED	45 519
Bamadougou	200		X		1974	FED	2 500
Longorala	50	X	X	X	1976-81-82	FED	22 490
Kargouan	160	X	X	X	1974-77-80-82	FED	40 957
Kado	200	X	X	X	1974-79-80	FED	20 000
Gouéné	65	X	X	X	1958	TD	2 700
Sieou	100	X	X		1981	FED	
Lolé	180	X	X		1981	FED	
Loulouni	800	X	X		1974	BIRD	7 500
Niena Est	128	X	X	X	1976-86-87	BIRD	170 600
Niena Ouest	30	X	X	X	1982	FED	8 359
Kobi (vallée)	180	X	X		1978	FED	
Zaniena	1 000	X	X		1979	FED	
Total	4 753						

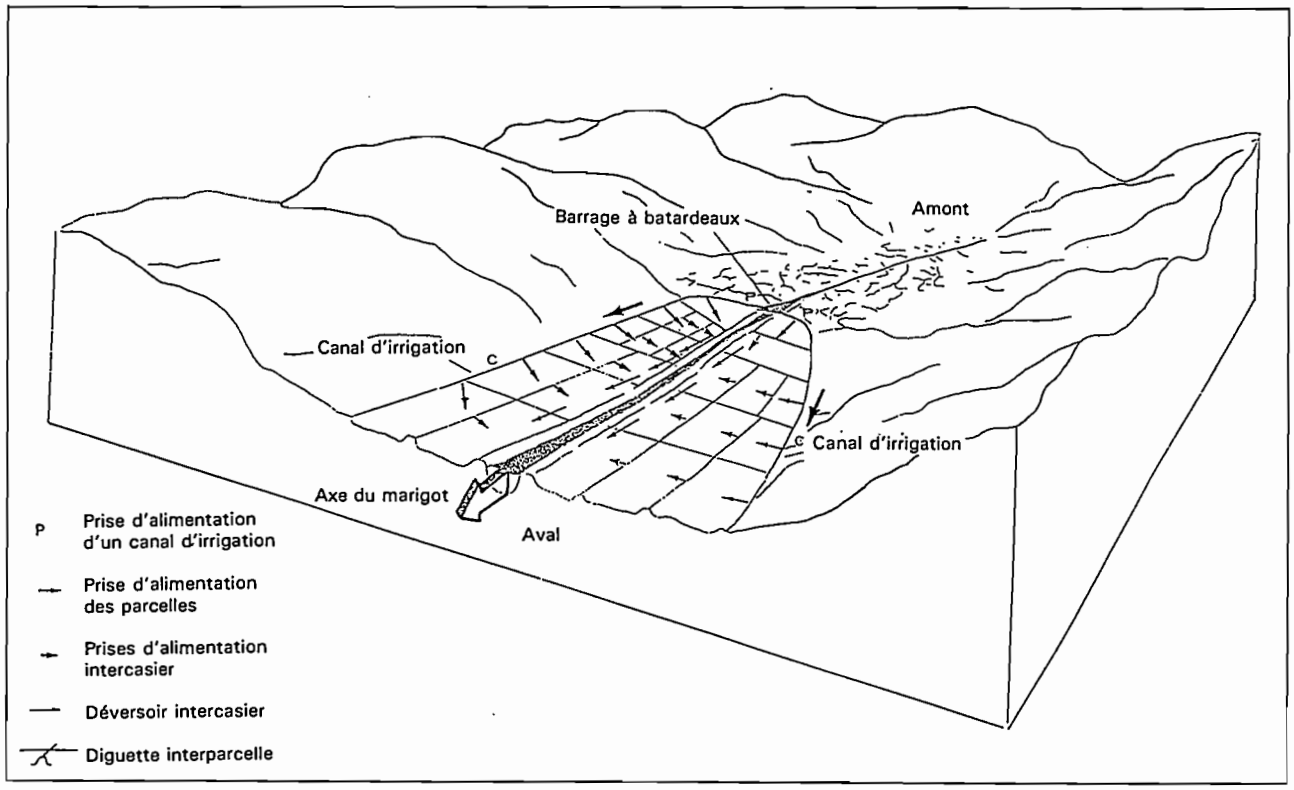


Figure 3. Principe de conception des aménagements du type FED.

l'illustrent : rendement moyen : 2 646 kg ha^{-1} ; écart-type : 881 kg ha^{-1}.

Faute d'un référentiel technique suffisant (autant en matière d'aménagemernt que d'agronomie), la CMDT a décidé de privilégier la mise en valeur des « petits bas-fonds » dans lesquels des aménagements de type digue déversante avec tranchée d'étanchéité (figure 4) permettent à la fois de réguler la hauteur de la lame d'inondation (cote de la digue) et de diminuer les phénomènes de drainage en amont de la digue (effet de la tranchée d'étanchéité).

L'étude de cas ci-dessous tente d'évaluer l'intérêt hydraulique d'un tel aménagement.

Aménagement du type digue déversante avec tranchée d'étanchéité : le cas de Kambo

Le terroir de Kambo

L'aménagement est situé dans la zone sud du Mali où environ 10 000 ha seraient potentiellement aménageables par cette technique (GADELLE, 1989).

Le bas-fond de Kambo est situé à 8 km de Kadiolo, et à quelques kilomètres de la frontière ivoirienne, dans la zone dépendant de la Direction régionale CMDT de Sikasso (5°48' longitude Ouest, 10°37' latitude Nord).

Milieu physique

Le bas-fond étudié est situé sur une zone de socle granitique et de roches volcaniques apparentées aux dolérites, datant du précambien moyen. Dans cette zone, le socle n'est pas masqué par des formations plus récentes et est présent sous forme d'une altérite reconnaissable aux petits éléments quartzeux qu'elle contient (ROUSSEAU, 1991). Il existe peu d'affleurements du granite en surface.

Le climat présente deux saisons des pluies bien marquées : une saison sèche qui dure de décembre à mai ; une saison humide, couramment appelée hivernage, qui s'étale de mai à novembre et durant laquelle tombe la quasi-totalité des pluies. La pluviométrie moyenne est de 1 100 mm (figure 5), le bilan hydrique restant néanmoins nettement déficitaire (figure 6).

Le bassin versant de Kambo, dont les caractéristiques physiques sont résumées dans le tableau VII, a une surface de 10 km^2 en amont du barrage (figure 7). La figure 8 illustre la courbe hypsométrique du bassin versant établie à partir des courbes de niveau tracées sur des photos aériennes au 1/50 000. La couverture végétale est de type savane arbustive mais de grandes zones sur les versants sont cultivées (environ deux tiers).

Le bas-fond (figure 9) est très allongé et peu large, entre 50 et 100 m. Sa superficie cultivable est de l'ordre de 25 ha, d'après l'étude des photos aé-

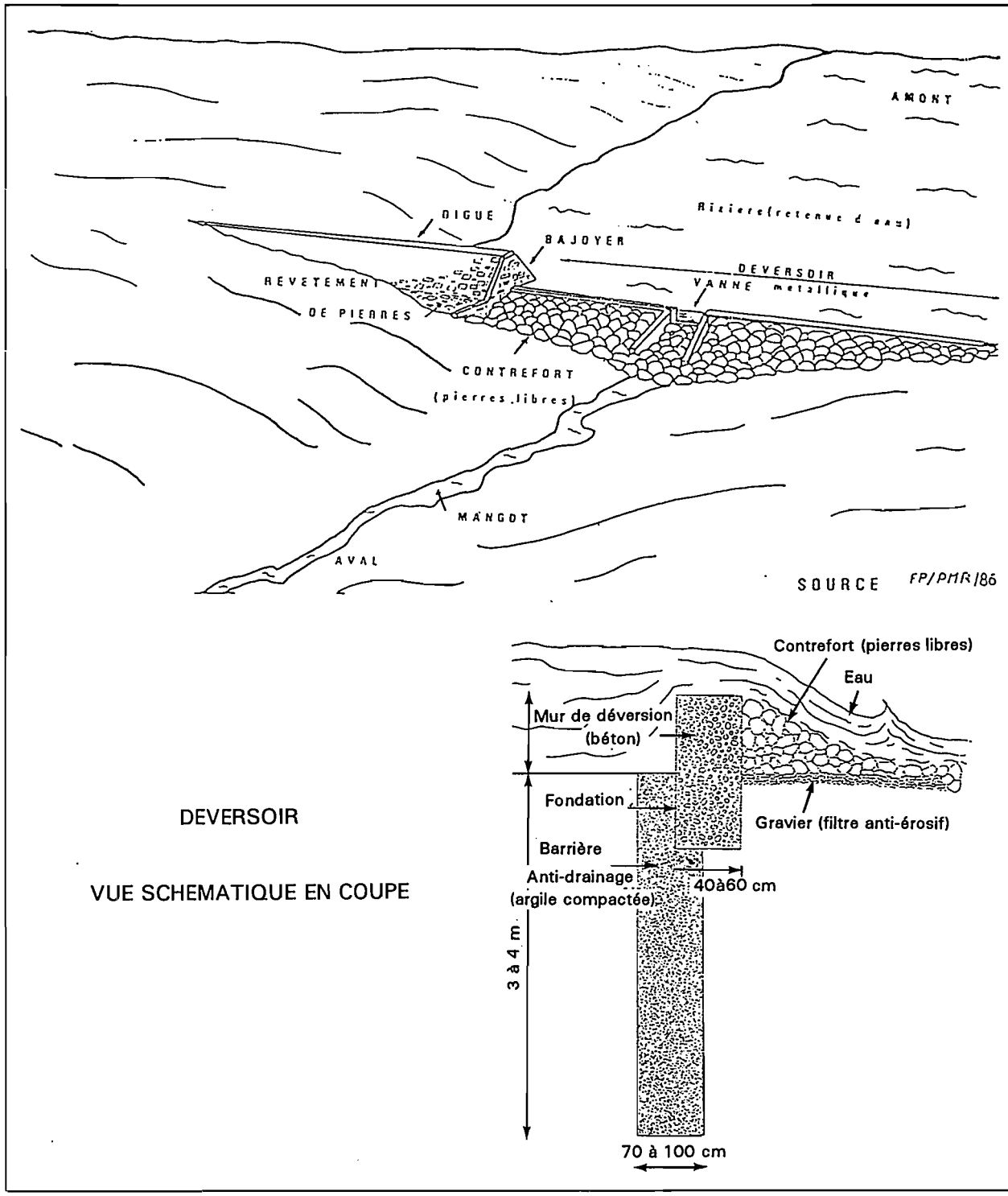


Figure 4. Schéma d'un aménagement du type digue déversante avec tranchée d'étanchéité.

riennes. La pente dans la zone aval en amont du barrage est de moins de 1 % sur 1 km, de l'ordre de 2,5 entre 1 et 3 km, pour terminer à 4 %.

L'exutoire du bas fond est la plaine du Kado située à 2 km en aval de l'aménagement.

Les résultats des analyses granulométriques indiquent un pourcentage important de sables fins et grossiers (Krier et Simpara, 1990 *a*). Les pH sont voisins de 5. L'indice de compacité est de 1,23.

Contexte agricole

Le bassin versant de Kambo correspond au terroir du village du même nom. Le nombre d'habitants est de 1 317, tous senoufou, répartis en trois principaux

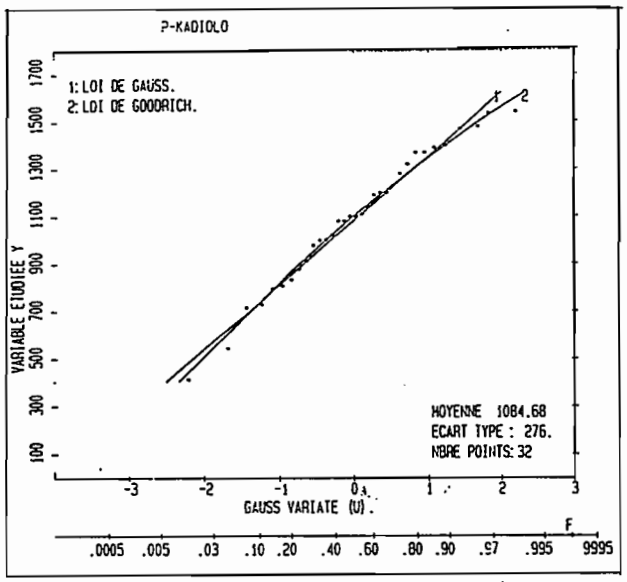


Figure 5. Analyse de la pluviométrie annuelle : station de Kadiolo.

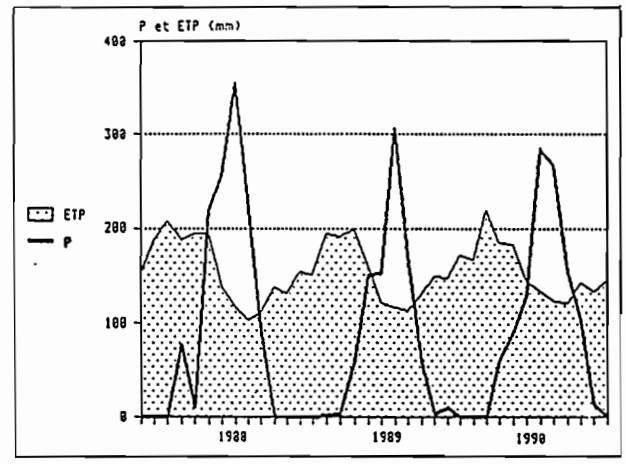


Figure 6. Bilan climatique : cas de Kambo.

quartiers. L'unité de production agricole (UPA) comprend en moyenne 18 personnes.

En 1990, 665 ha ont été cultivés, soit les deux tiers du bassin versant (dont 20 ha dans le bas-fond).

Les cultures pratiquées sont résumées par le tableau VIII.

Près de 22 % des UPA ne disposent d'aucune parcelle dans le bas-fond. La mise en valeur des bas-fonds est essentiellement le fait des femmes (78 % des parcelles) ; 63 % des rizicultrices ont entre 41 et 60 ans. Mis à part quelques petits jardins, la disparition de la nappe ne permet pas des cultures de contre-saison.

L'essentiel des revenus est réalisé à partir du coton, la riziculture restant très marginale dans l'exploitation.

L'un des objectifs de la CMDT est de diversifier les sources de revenu et, de ce fait, de promouvoir la riziculture dans cette région où la demande des villes n'est pas assurée par la production locale.

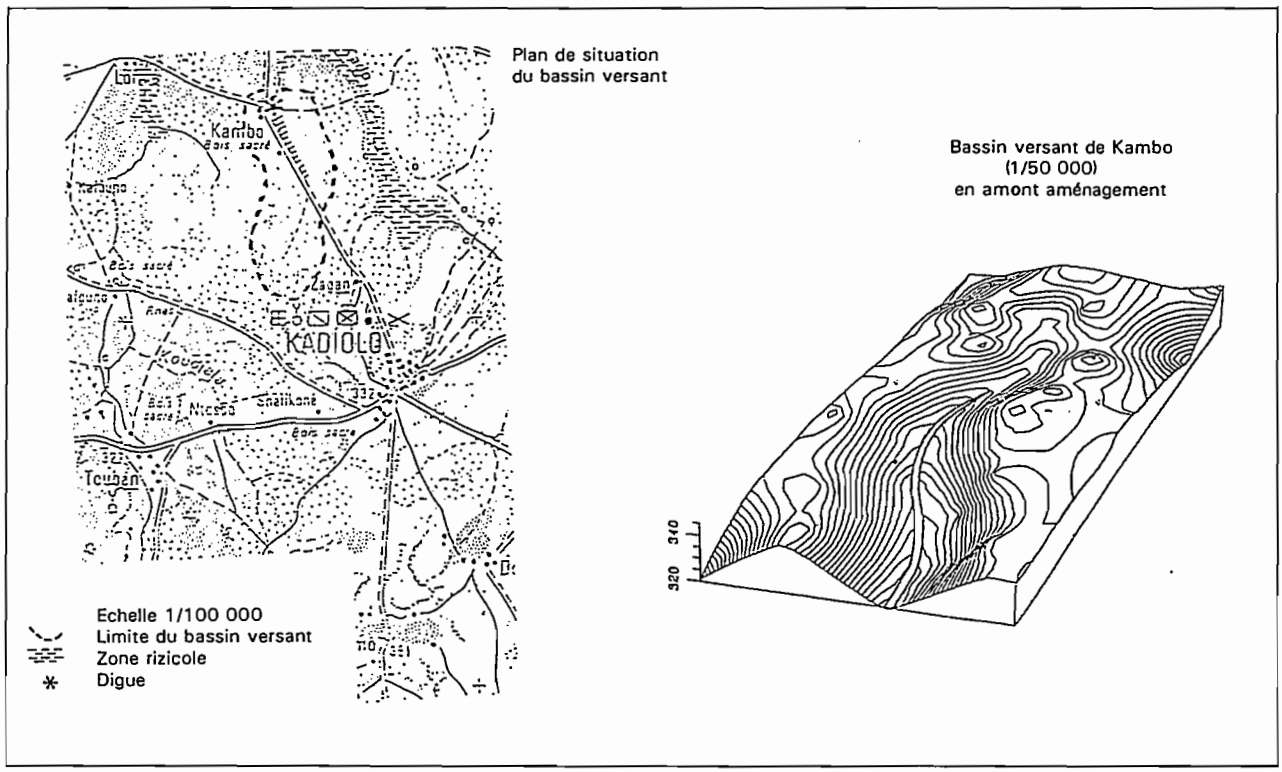


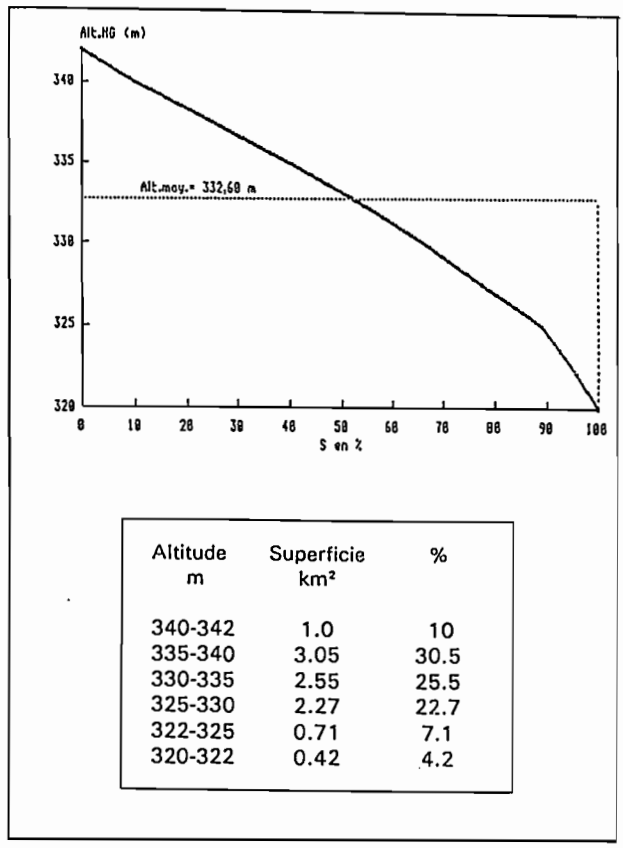
Figure 7. Caractéristiques du bassin versant de Kambo.

Tableau VII. Caractérisation du bassin versant de Kambo en amont du barrage (d'après ALBERGEL *et al.*, 1991).

Superficie (km²)	4,7
Périmètre (km)	9,5
Altitude du zéro de l'échelle (NG) (m)	325,6
Indice de compacité	1,23
Longueur du rectangle équivalent (km)	3,36
Largeur du rectangle équivalent (km)	1,4
Indice de pente (entre 5 % et 95 % de S (m/km)	4,01
Indice de pente de roche	0,068
Altitude moyenne (m)	336
Paramètres morphologiques	
Classe du relief (méthode Rodier Auvray)	R2
Classe du relief (méthode Olivry)	R2-0
Classe de perméabilité	P3-4
Classe de couverture végétale (Olivry)	V2-3

Tableau VIII. Les cultures pratiquées dans le bassin versant de Kambo.

Culture	Superficie (ha)	Pourcentage
Coton	225	33
Mil-sorgho-maïs	260	40
Riz pluvial (bas-fond)	20	3
Arachide-niébé-voandzou	90	14
Fonio-igname	70	10



Altitude m	Superficie km²	%
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 hypsométrique du bassin versant de Kambo.

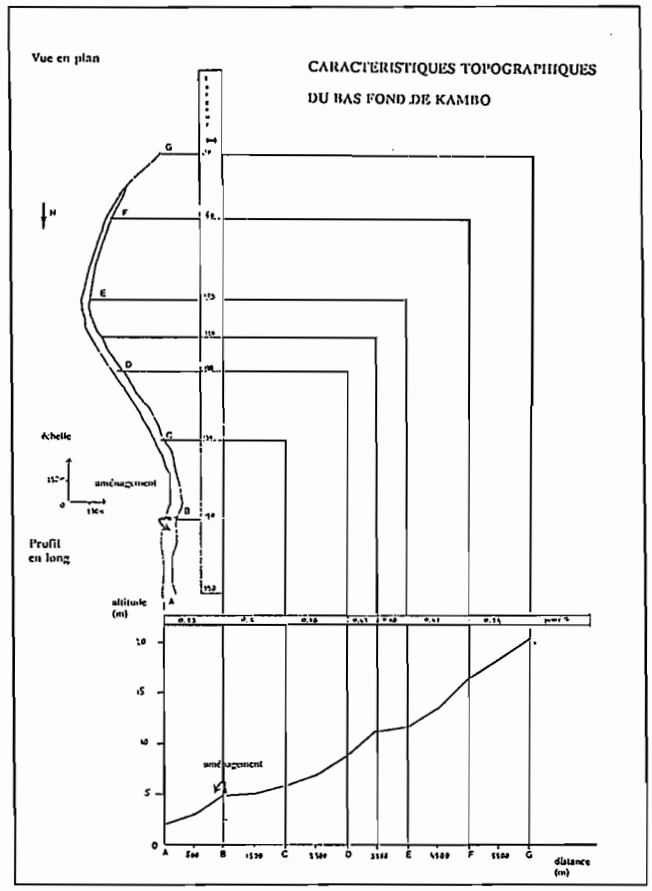


Figure 9. Caractéristiques topographiques du bas-fond de Kambo.

Caractéristiques de l'aménagement

Description

La conception de l'aménagement, par les Volontaires du progrès en 1988, reposait sur la constatation que, dès que les écoulements diminuent, le niveau de la nappe descend rapidement (1,5 à 2 cm par jour).

Pour éviter cette descente rapide de la nappe et régulariser le niveau de l'eau en amont, il a été réalisé un aménagement de type digue déversante munie d'un écran d'étanchéité (figures 10 et 11).

Il se compose des éléments suivants : un muret déversoir en béton cyclopéen (hauteur maximale par rapport au terrain naturel : 64 cm) ; ce muret est protégé en amont par un massif en terre compactée recouvert d'un perré non maçonné (talus 1 pour 2) ; une tranchée d'étanchéité placée sous la digue et réalisée en argile compactée (profondeur maximale 1,70 m, largeur 1 m) ; un pertuis batardable muni de bajoyers (largeur 3 m) permettant de régulariser le niveau de l'eau en amont.

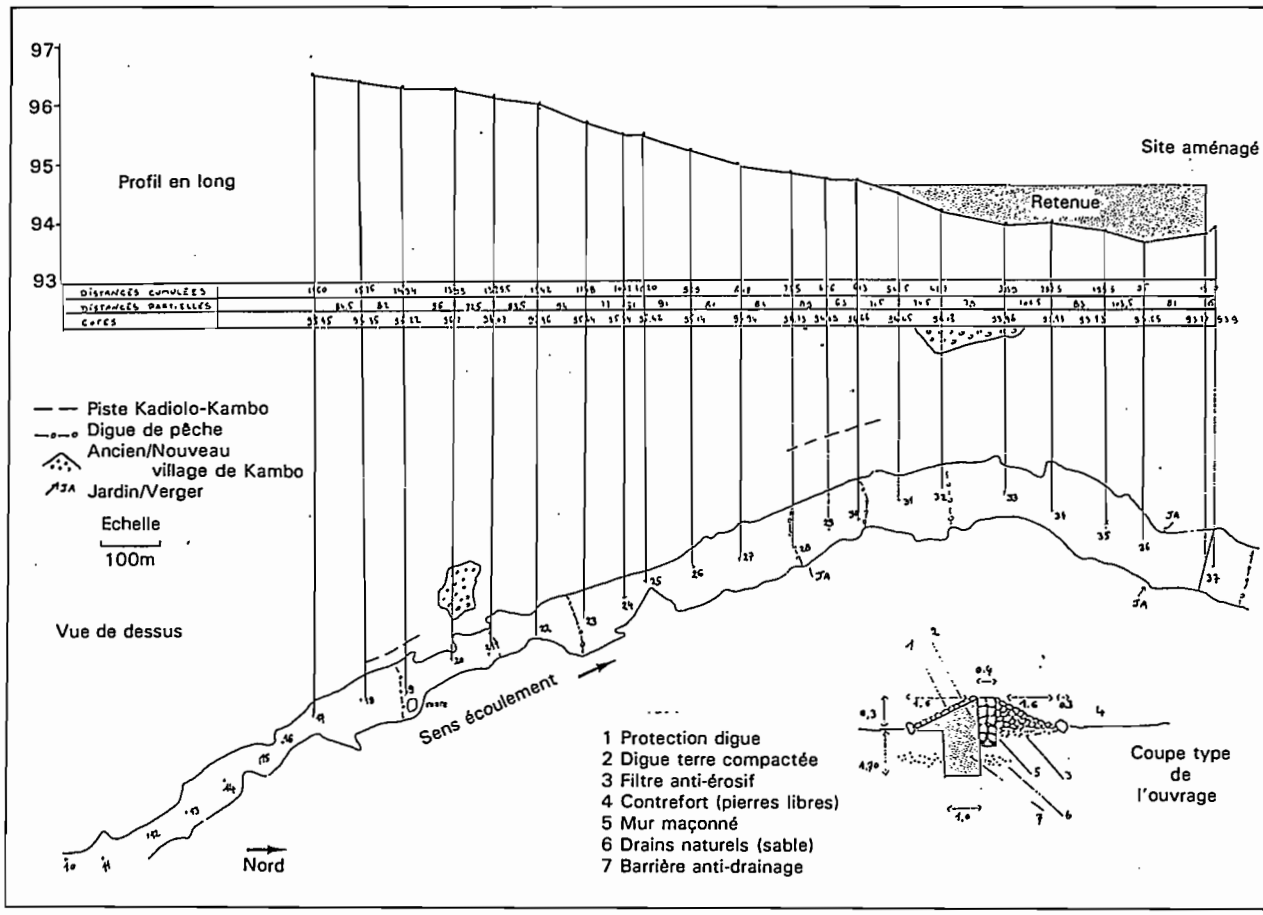


Figure 10. Plan général de l'aménagement.

Ces équipements permettent de maintenir une lame d'eau sur une surface de l'ordre de 5 ha (figures 12 et 13) et d'évacuer les crues exceptionnelles. La largeur du bas fond à cet endroit étant de 113,5 m, la digue est déversante sur toute sa longueur. Q10 = 9 à 12 $m^3 s^{-1}$ suivant les méthodes utilisées. Lors de la crue de projet, la hauteur d'eau de la lame déversante serait limitée à 0,31 m.

Estimation du coût

Le coût de l'aménagement (réalisé par entreprise) serait de l'ordre de 58 000 FF. Dans la pratique, une part importante des travaux a été réalisée par les paysans. Le coût financier de la construction est ainsi ramené à 38 659 FF, soit 7 028 FF à l'hectare (tableaux IX et X).

Tableau IX. Estimation des coûts : réalisation par entreprise.

	Unité	Quantité	Prix unitaire (FF)	Prix (FF)
1. Terrassement				
1.1. Déblai				
Tranchée étanchéité	m^3	188	30	5 640
1.2. Remblai compacté				
Tranchée étanchéité	m^3	188	36	6 768
Digue	m^3	53	24	1 272
2. Maçonnerie				
200 kg/m^3 ciment	m^3	34	1 000	34 000
3. Empierrement				
3.1. Perrés	m^2	77	10	770
3.2. Massif enrochement	m^3	80	30	2 400
4. Batardeaux métalliques	u	2	1 000	2 000
5. Frais d'étude	10 %			5 285
Total				58 135

Tableau X. Estimation des coûts : réalisation avec participation villageoise.

	Prix entreprise	% réalisation paysanne	Coût financier
1. Terrassement			
1.1. Déblai			
Tranchée et étanchéité	5 640	80	1 128
1.2. Remblai compacté			
Tranchée étanchéité	6 768	70	2 030
Digue	1 272	70	382
2. Maçonnerie			
3. Empierrement	34 000	20	27 200
3.1. Perrés	770	80	154
3.2. Massif enrochement	2 400	80	480
4. Batardeaux métailliques	2 000	0	2 000
5. Frais d'étude	5 285	0	5 285
Total	58 135		38 659

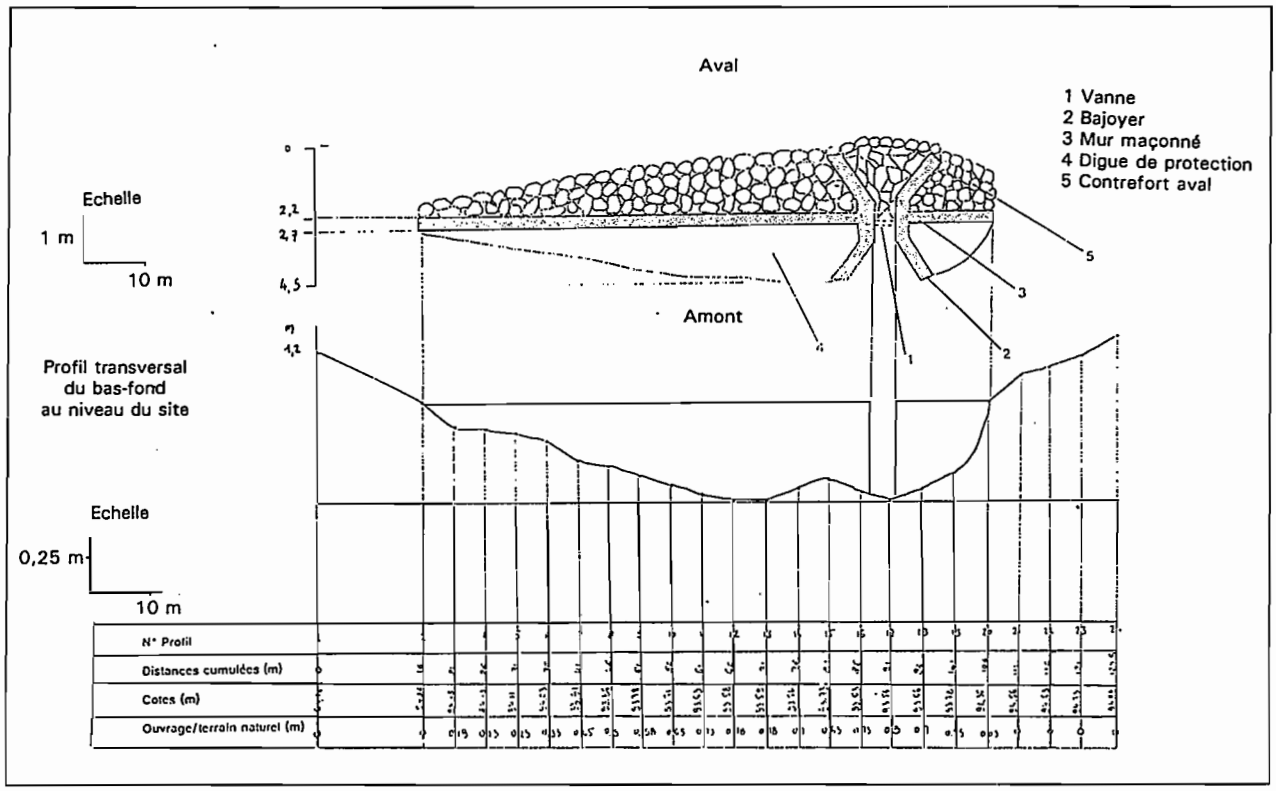


Figure 11. Plan de l'ouvrage réalisé à Kambo.

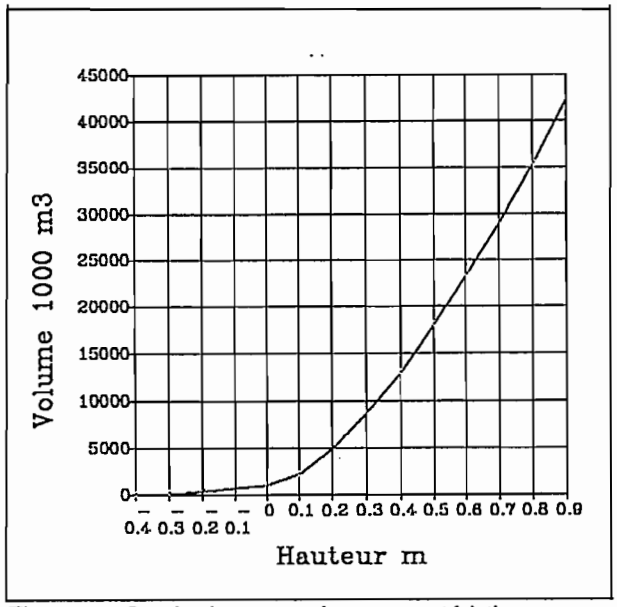


Figure 12. Courbe hauteur-volume caractéristique de la retenue.

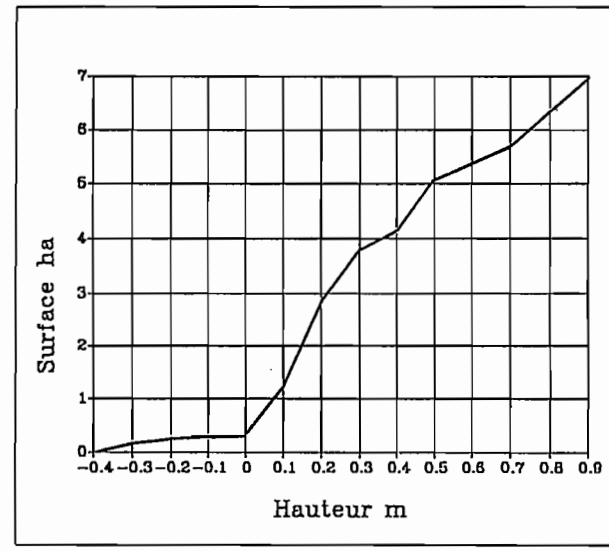


Figure 13. Courbe hauteur-surface inondée caractéristique de la retenue.

Intérêt hydraulique de l'aménagement

Dispositif de suivi

Le dispositif de suivi mis en place sur le bassin versant de Kambo dépasse le seul objectif d'évaluer l'efficacité de l'aménagement. Il vise à la mise au point d'un outil de diagnostic rapide, basé sur l'évaluation de paramètres déterminants du processus hydraulique, permettant d'estimer la dynamique des flux hydriques et d'en déduire la possibilité d'aménager. La figure 14 illustre le dispositif mis en place sur le bas-fond et le bassin versant. L'implantation et le suivi ont été réalisés par l'équipe ORSTOM. Le tableau XI indique les périodes d'observation, la quantité et la qualité des données.

Tableau XI. Nature, quantité et qualité des observations hydrologiques.

Rubrique	1988	1989	1990
Pluviométrie			
Pluviomètre	3		
Pluviographe	1		
Quantité jours de pluie	74		
Qualité (année)	Incomplète	Complète	Complète
Limnigraphie			
Station	1	2	2
Quantité	Continu	Continu	Continu
Enregistrement			
Qualité (année)	Incomplète	Complète	Complète
Piézométrie			
Piézomètre	15	36	36
Puits villageois		19	19
Piézographes		2	3
Quantité	1/5 jours	1/5 jours	1/5 jours
Qualité (année)	Incomplète	Complète	Complète
Evaporation			
Bac flottant			Année complète

Jaugeages station amont : 10 jaugeages entre cote 0-78 cm, courbe d'étalonnage bi-univoque.
Jaugeages station aval : 132 jaugeages, 3 courbes d'étalonnage suivant le nombre de batardeaux.

Efficacité de la tranchée d'étanchéité

Son évaluation a été faite en prenant en compte les paramètres suivants.

• Les volumes disparus dans le barrage. Volume disparu : Vu ; volume évaporé : Ve (évalué grâce au bac flottant) ; volume infiltré : Vi ; volume d'apport : Va. Vu = Ve + Vi – Va durant la période d'étude choisie (fin décembre Va = 0) ;

• La relation existant entre la charge et le niveau de la nappe en aval. La charge est théoriquement proportionnelle aux infiltrations ; le niveau de la nappe est une des principales caractéristiques des écoulements en aval :

– H_i : différence de charge (en m) entre amont et aval du barrage ;

– h_{50} : niveau du toit de la nappe aval (12 m en aval), au jour i (en m) (par rapport au zéro du nivellement des mesures) ;

– $H_i = 0{,}186\ h_{i50} + 0{,}619$ (r = 0,73).

• La perméabilité horizontale estimée à partir des mesures *in situ* (K_h compris entre 2,7 et 5 . 10^{-3} s m^{-1}).

• L'incertitude sur la puissance de la nappe aval (variant de 2 m à 2,50 m).

• Le gradient hydraulique de la nappe aval i (en m m^{-1}). Calculé entre le piézomètre 50 situé à 12,5 m en aval du barrage et le piézomètre 53 situé à 194 m en aval (paramètre d'évaluation du débit dans la mesure où le niveau général de la nappe baisse).

• La loi de Darcy pour évaluer les débits évacués en aval, $q_i = T_i \times Ii$, avec :

T_i : transmissivité de la nappe en $m^2\ s^{-1}$) ;

I_i : pente de la nappe (en m m^{-1}) au jour i ;

q_i : débit (en m^3 par m de largeur du bas fond) au jour i.

• La loi d'approximation des débits infiltrés sous une parafouille (à laquelle est assimilée la tranchée d'étanchéité) : $q = (K \times H\ 3{,}14) \times \mathrm{Log}\ [a/c + ((a/c)^2 - 1]^{1/2}$ avec « a » puissance de la nappe (m), « c » profondeur de la parafouille (m), K perméabilité (m s^{-1}), H différence de charge entre amont et aval (m).

Pour vérifier le domaine d'application de cette relation, on s'est assuré que la valeur du Log était indépendante du niveau de la nappe en aval (coefficient de corrélation 0,15 pour 25 couples de mesures).

Malgré les incertitudes sur les propriétés hydropédologiques du milieu, la modélisation montre (tableau XII) l'importance de l'effet de la tranchée d'étanchéité. Est mise en évidence la présence d'un seuil naturel comme le laissait supposer la reconnaissance des sols au niveau de la digue (figure 15).

Pour évaluer l'effet pratique de la tranchée d'étanchéité, nous avons comparé la simulation de la vidange de la retenue avec et sans tranchée d'étanchéité.

Sans tranchée d'étanchéité, le débit (en $m^3\ s^{-1}$) par mètre linéaire d'ouvrage)a été évalué par l'équation :

$Q = K \times H \times b / (b + a)$

avec :

b : puissance de la nappe sous l'ouvrage (m),

a : largeur de la l'ouvrage (m),

K : perméabilité horizontale (m s^{-1}),

H : charge hydraulique (m).

Le tableau XIII en donne les résultats et montre l'intérêt de la tranchée d'étanchéité : durée de vidange allongée d'une vingtaine de jours.

Le tableau XIV illustre l'allongement de la durée de présence de la lame d'eau due à la tranchée suivant les zones (hypothèse : puissance de la nappe 2,50 m, perméabilité horizontale 3,8 . 10^{-3} m^{-1}).

On remarquera d'autre part que, pour assurer la longévité de l'aménagement, une telle tranchée d'étanchéité s'impose pour satisfaire aux critères de

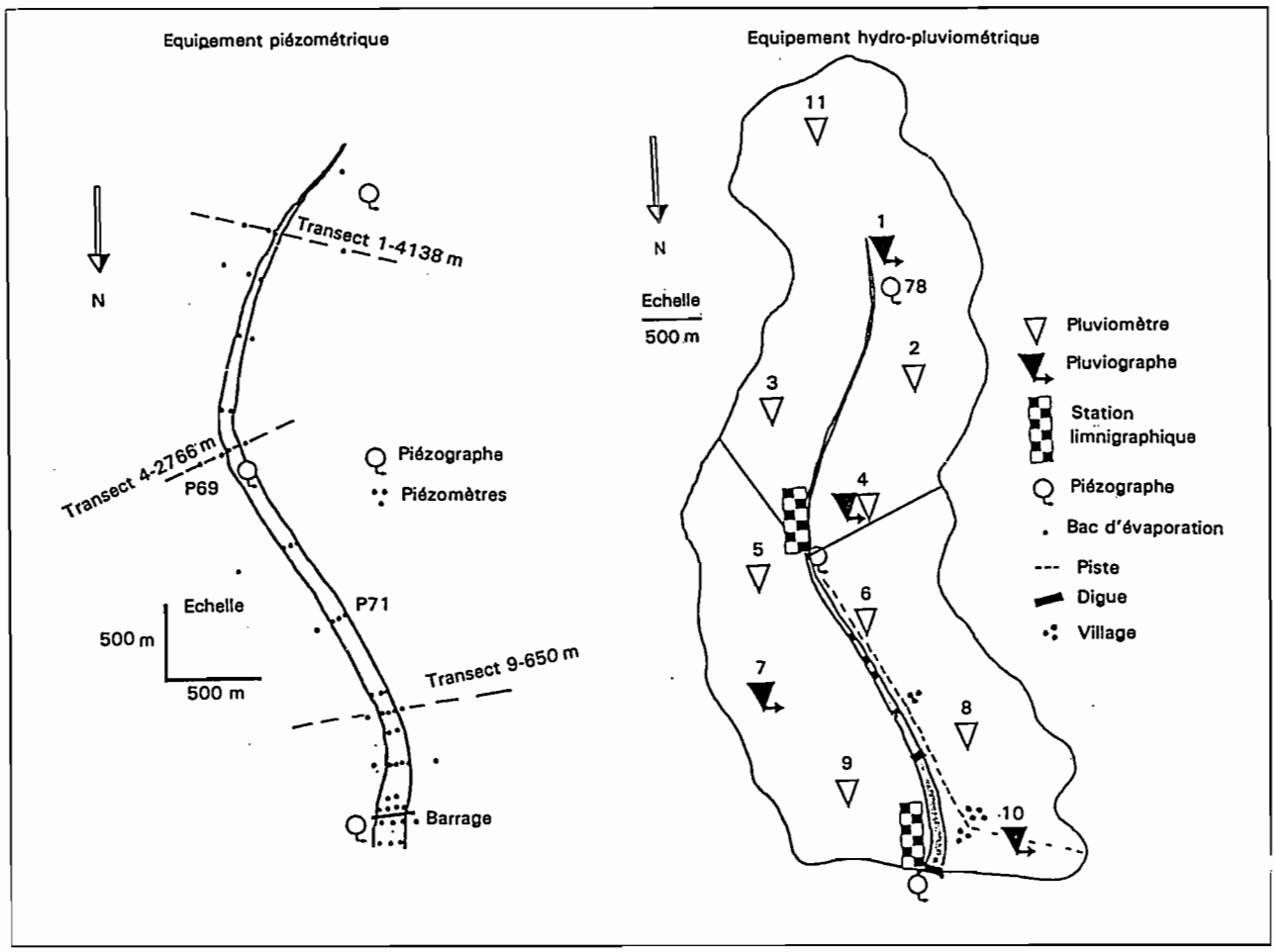


Figure 14. Dispositif de mesure mis en place sur le bas-fond et le bassin versant de Kambo.

perte de charge sous l'ouvrage donnés par la règle de Lane (pour un coefficient de Lane de 1,4 — classe de sols filtrants —, la profondeur de la tranchée d'étanchéité devrait être de 1,5 m compte tenu des caractéristiques de l'ouvrage).

Sécurisation de la riziculture

Méthode utilisée

Cette estimation a été faite en couplant plusieurs modélisations (PARIENTE, 1990) .

• Une modélisation journalière du fonctionnement du barrage, intégrant :

– les apports d'une modélisation des écoulements (modèle CEMAGREF-GR3 (EDIJATNO et MICHEL, 1989) calée sur les mesures pluie-débit des trois années de suivi (ALBERGEL, 1989 ; ALBERGEL *et al.*, 1991 ; GUIGEN, 1990 *a, b ;* GUIGEN et PARIENTE, 1990 ; PEPIN, 1989 *a, b ;* PEPIN et PARIENTE, 1990) ; son calage s'est avéré particulièrement satisfaisant (figure 16) : critère Nash 54,4 % (seuil calage acceptable 50 %) erreur de bilan 5,2 % (erreur relative sur l'estimation des débits), rapport des crues 91,3 % (rapport estimation des fortes crues ; moyennes sur 3 ans) ;

– les pertes par évaporation (ETP Sikasso) ;

– les pertes par infiltration estimées à une descente du plan d'eau de 2 cm/jour (valeur moyenne mesurée et correspondant aux résultats des simulations) ;

– les apports pluviométriques ;

– les déversements au-dessus de la cote du déversoir central et évacuateur de crue

• Une modélisation du statut hydrique du sol, avec et sans aménagement :

– avec aménagement, on a considéré que la réserve en eau du sol utilisable par la plante (RU) était pleine lorsque le niveau de la nappe était à moins de 0,2 m de la surface du sol (0,2 m profondeur de l'enracinement du riz évalué *in situ*) ;

– sans aménagement, on a considéré que, lorsqu'il y avait écoulement,la nappe était affleurante et descendait de 0,02 m/jour dès que les écoulements s'arrêtaient de façon significative.

Tableau XII. Evaluation par modélisation de l'effet de la tranchée d'étanchéité.

Puissance nappe (m)	Perméabilité horizontale 10^{-3} m s^{-1}	% obturation Avec tranchée (prof. 1,5 m)	Sans tranchée
2,00	4,6	99,45	24,68
2,25	4,15	99,50	33,1
2,50	3,8	99,54	39
2,75	3,47	99,60	44,93
3,00	3,18	99,65	49,85

Tableau XIII. Durée de vidange de la retenue en fonction de la présence ou non d'une tranchée d'étanchéité.

Puissance nappe	Perméabilité horizontale 10^{-3} m s^{-1}	Durée vidange (jours) Avec tranchée	Sans tranchée
2,00	4,60	27	8
2,25	4,15	29	9
2,50	3,80	30	10
2,75	3,47	32	11
3,00	3,18	34	12

Tableau XIV. Evaluation de la durée de présence de la nappe en phase de vidange suivant les zones (en jours), avec ou sans tranchée d'étanchéité.

	Sans tranchée	Avec tranchée	Gain
Zone basse	10	30	20
Zone moyenne	5	18	13
Zone haute	3	13	10

La même hypothèse, avec et sans aménagement, a été retenue quant au remplissage de la RU.

• Une modélisation du bilan hydrique de la culture (modèle Bipode) (VAKSMAN, 1990) pour un riz de 150 jours dans les situations caractéristiques : zone haute, lame d'eau maximale 64 cm ; zone moyenne, lame d'eau maximale 40 cm ; zone basse, lame d'eau maximale 24 cm

Cette modélisation, réalisée sur les 25 années pluviométriques disponibles, a pris en compte l'évolution, outre la pluviométrie, du statut hydrique du sol lié au remplissage du barrage ou à un écoulement.

Il est évident que cette approche, réalisée sur la base des critères de satisfaction des besoins en eau d'un riz pluvial, est sujette à certaines réserves. En particulier, les essais riz de bas-fond semblent démontrer l'importance de l'effet du battement de nappe et du drainage sur le comportement de la culture et son rendement.

Aussi, c'est plutôt la démarche permettant d'intégrer agronomie, gestion de l'eau à la parcelle et fonctionnement de l'aménagement qui nous semble intéressante à retenir, plutôt que les résultats bruts obtenus.

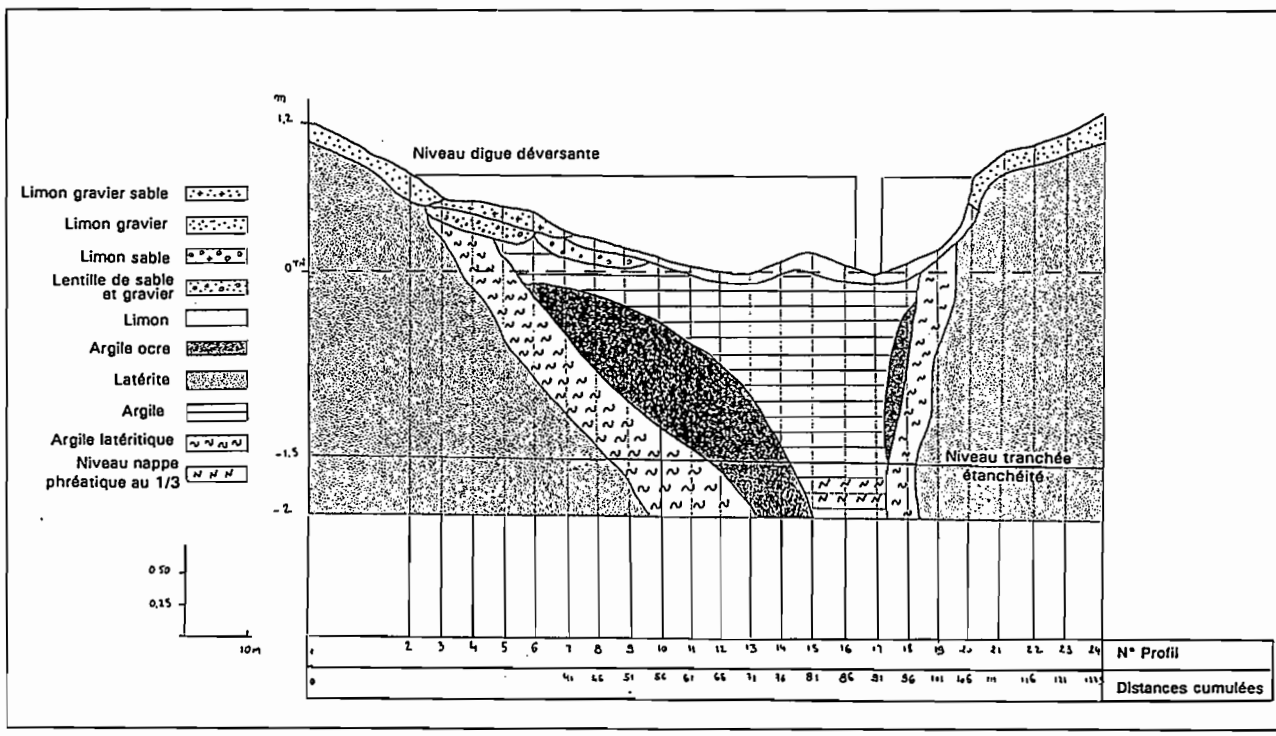


Figure 15. Profil transversal de répartition des différents types de sol au niveau de l'aménagement.

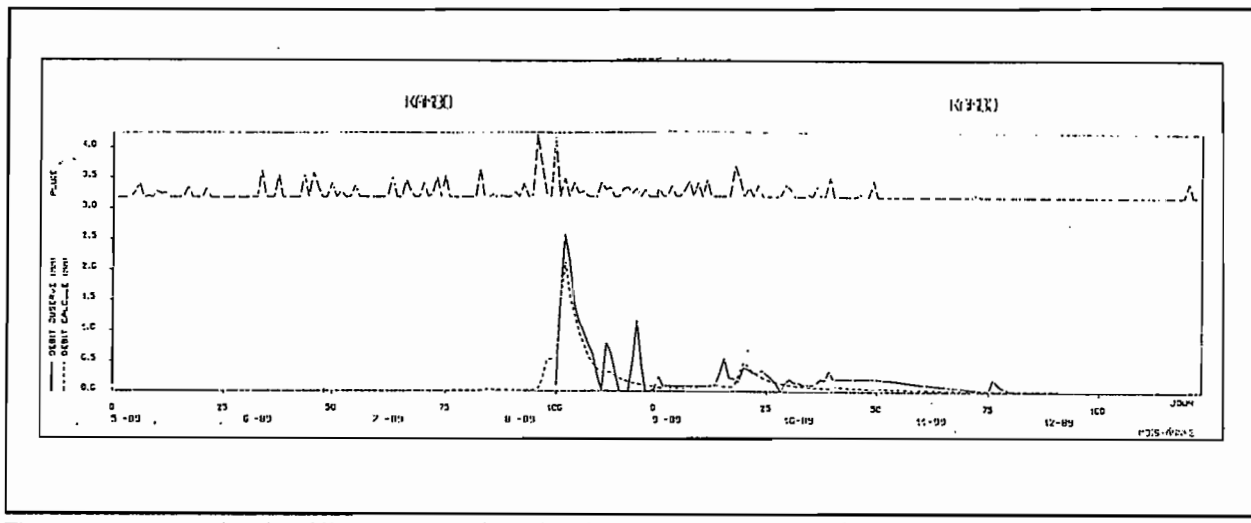


Figure 16. Modélisation des débits : comparaison des débits simulés et observés (modèle GR3).

Résultats de la simulation

Le tableau XV illustre les résultats de la simulation pour les quatre situations retenues.

L'analyse des fréquences au dépassement des ETR/ETM simulés pour les différentes zones montre que leur loi de distribution est de type normal. Le tableau XVI en donne les paramètres pour les différentes situations.

Cette constatation a permis de caractériser les seuils ETR/ETM correspondant, sans aménagement, aux bonnes années (33 probabilités de dépassement), mauvaises années (66 de probabilité de dépassement de ETR/ETM cycle) et moyennes années (valeurs de ETR/ETM comprises entre ces seuils).

Pour chacun de ces cas de figure et suivant les différentes zones, on a ainsi évalué le pourcentage moyen d'amélioration apporté par l'aménagement (tableau XVII).

Il en ressort que l'efficacité hydraulique de ce type d'aménagement est optimale en années moyennes et sur les zones moyennes et basses

Intérêt économique de l'aménagement

Pour estimer l'intérêt économique de l'aménagement, on s'est servi d'une fonction de production mise au point en Côte-d'Ivoire sur riz pluvial (Forest et Reyniers, 1985), en l'absence de références agro-hydrauliques suffisantes dans la zone :

R/Rmax. = 1,92 x ETR/ETM cycle – 0,92.

Pour caler la valeur de Rmax., on s'est servi des résultats d'enquêtes agronomiques effectuées sur l'aménagement (Krier et Simpara, 1990 *c*) en 1990 :

Tableau XV. Résultats de la simulation du taux de satisfaction en eau (en %) d'un riz de 150 jours suivant les différentes zones avec et sans aménagement ETR/ETM cycle en %.

Année	Avec aménagement			Sans aménagement		
	ZH	ZM	ZB	ZH	ZM	ZB
1963	88	88	88	83	86	88
1964	87	87	88	82	85	87
1965	91	94	94	78	81	83
1966	87	87	87	76	79	81
1967	92	92	92	76	79	81
1968	88	89	89	79	82	84
1969	93	93	93	82	85	87
1970	87	91	93	72	75	77
1971	79	82	85	92	95	67
1972	86	91	94	72	75	77
1973	84	87	90	69	72	74
1974	91	93	94	84	87	89
1975	90	91	92	69	72	74
1976	83	90	91	76	79	81
1977	80	84	89	66	68	70
1978	88	88	88	79	82	84
1979	62	66	66	57	59	61
1980	90	90	90	79	82	84
1981	72	78	84	60	62	64
1982	38	38	38	35	36	38
1983	30	30	30	27	28	30
1984	54	59	65	50	52	54
1985	65	76	84	61	63	65
1986	80	84	86	69	72	74
1987	84	87	89	67	69	71

ZH : zone haute.
ZM : zone moyenne.
ZB : zone basse.

Tableau XVI. Paramètres des lois normales de distribution des différents indices de satisfaction suivant les zones.

	Zone	Moyenne (%)	Ecart-type
Avec aménagement	ZH	78,76	16,69
	ZM	81,4	16,52
	ZB	83,16	16,51
Sans aménagement	ZN	68,44	14,31
	ZM	71	14,91
	ZB	73	14,91

ZH : zone haute.
ZM : zone moyenne.
ZB : zone basse.

Tableau XVII. Amélioration moyenne du taux de satisfaction des besoins en eau des cultures (en %) sous l'effet de l'aménagement.

Années	Zone haute	Zone moyenne	Zone basse	% moyen
Mauvaises	10,5	14,07	14,84	13,13
Moyennes	15,78	19,81	23,0	19,53
Bonnes	11,99	9,3	7,1	9,46
% moyen	12,75	14,39	14,98	

– ETR/ETM (zone basse, aménagée) : 0,84 ;

– rendement moyen (résultat d'enquêtes) : 2 100 kg ha^{-1} ; rendement potentiel calculé : 3 000 kg ha^{-1} .

Le tableau XVIII évalue sur les 25 ans de simulation les rendements moyens par zone et sur l'ensemble de la zone aménagée avec ou sans digue et sans intensification.

En fait, la digue a un effet régulateur en aval (de l'ordre de 1 ha) et peut être assimilée à une zone à maîtrise au moins égale à une zone haute.

Dans ces conditions, le coût à l'hectare de l'aménagement serait (en faisant l'hypothèse que les frais d'étude seront pris en charge par un financement extérieur) de 5 150 FF.

En estimant à 1 % les frais d'entretien (a priori minimes, le seul risque étant lié à une crue exceptionnelle déplaçant les pierres libres en aval) et à 4 % le taux d'actualisation, en 9 ans, sans changer les pratiques culturales, l'aménagement serait rentabilisé.

L'aménagement réalisé par les Volontaires du progrès n'a été facturé que 12 000 FF, soit 1 860 FF l'hectare. On comprend, dans ces conditions, le vif intérêt des paysans pour cet aménagement qui :

– sera rentabilisé en deux campagnes (prix du paddy : 1,40 F/kg) ;

Tableau XVIII. Variation des rendements moyens interannuels simulés avec et sans aménagement (t ha^{-1}).

	Zone haute	Zone moyenne	Zone basse	Ensemble aménagement
Sans aménagement	1,26	1,40	1,50	1,44
Avec aménagement	1,84	1,99	2,09	2,03
Gain dû à l'aménagement	+ 0,58	+ 0,59	+ 0,59	+ 0,59
Surface (ha)	0,6	1,65	3,25	5,5

Tableau XIX. Evaluation de la durée d'amortissement de l'aménagement (en années).

% subvention	Sans intensification	Avec intensification
75	3	2
50	6	4
25	10	6
0	17	9

– a induit un certain nombre d'activités annexes (pêche, petit maraîchage le long de la retenue),

– permet de disposer d'eau pour les travaux ménagers (lessive, etc.).

Pour estimer l'intérêt de l'intensification, on s'est référé aux résultats agronomiques obtenus par le programme IER-CIRAD de riziculture inondée (rendement moyen interannuel : 3 t ha^{-1}). Les charges d'intensification afférentes sont estimées à 700 FF par hectare. Nous avons calculé la durée d'amortissement de l'ouvrage avec pour hypothèses : un taux d'actualisation de 4 % ; des frais d'entretien annuels de 1 % du prix de l'ouvrage ; 8 années sur 10 l'agriculteur a au moins le même bénéfice que sans aménagement, tout en remboursant les frais d'intrants liés à l'intensification et la redevance.

Le tableau XIX résume ces résultats et montre d'une part que, lorsque l'aménagement est subventionné à plus de 50 %, l'intensification joue peu sur sa durée d'amortissement, d'autre part que l'intensification permet d'amortir l'aménagement sur une durée raisonnable, même sans subvention.

Reste la question du réalisme de l'hypothèse sur l'accès des rizicultrices aux intrants.

Si la subvention généralisée n'est pas non plus une solution, la diminution du coût des aménagements reste la seule alternative envisageable. Une diminution du coût financier de 25 % devrait être possible en augmentant l'aire d'influence du barrage par des ouvrages en cascade.

Conclusion

Contrairement aux aménagements de plaine qui posent à l'encadrement de nombreux problèmes et sont largement sous-utilisés, les petits aménagements du type de celui de Kambo sont très appréciés des villageois ; le grand nombre de villages demandant à en être équipés est révélateur.

Les conclusions de l'évaluation permettent de quantifier ce succès ; compte tenu de l'importance de la subvention (70 %), ce type d'aménagement est amorti en 3 ans sans changement des techniques culturales des rizicultrices.

Les traditions socio-culturelles et l'absence d'une action de vulgarisation axée sur la riziculture féminine font que l'accès des femmes aux intrants risque à court terme d'être difficile.

Ce type d'aménagement semble tout à fait adapté pour s'intégrer dans une stratégie d'aménagement du terroir prise en charge par les associations villageoises.

Sans subvention, cet objectif pourrait être atteint dans un contexte similaire :

– en réduisant le coût à l'hectare de l'ordre de 25 % par une augmentation de l'aire d'influence du barrage (aménagements en série) ;

– en évaluant plus précisément l'impact socio-économique de l'aménagement sur l'activité villageoise ;

– en étudiant les possibilités d'amélioration de la gestion de l'eau de la retenue et des pratiques culturales actuelles (en particulier, calage des cycles, variétés plus adaptées, semis direct ou repiquage suivant les zones) (SANOU, 1990).

La réussite de l'aménagement « Kambo » est liée à un contexte agro-écologique favorable ; la fertilité des sols n'est pas un facteur limitant en culture traditionnelle, il existe un débit de base significatif à ce niveau du bas-fond et un seuil naturel. Vulgariser sur d'autres sites cette technique d'aménagement suppose qu'on soit à même d'identifier ces conditions favorables.

Dans d'autres situations telles que les « grandes plaines », les travaux de recherche (AHMADI *et al.*, 1990 ; AHMADI *et al.*, 1991 ; AHMADI et DIABY, 1991 ; SRCVO, 1990 ; HUSSON, 1990) tendent à montrer qu'au contraire, sans aménagement, une intensification à raisonner en fonction des risques hydriques est économiquement intéressante. Seul le recours à des ouvrages lourds semble permettre une régularisation des flux hydriques. Cela suppose une intensification importante de la culture pour rentabiliser de tels investissements.

On passe alors d'une problématique de type « aménagement de terroir » à une tout autre problématique, de type « vulgarisation de techniques culturales » ou « petit périmètre irrigué », avec des contraintes de rentabilité, d'intégration dans le système de production et d'identification des cibles susceptibles d'être intéressées (exploitations agricoles et non plus les femmes, entrepreneurs privés et assimilés comme les fonctionnaires).

Aussi, vulgariser à bon escient un type d'aménagement tel que celui de Kambo suppose :

– une méthode permettant d'identifier les contextes agro-écologiques favorables ;

– des techniques de diagnostic rapide permettant d'évaluer la puissance de la nappe, la présence de seuils, l'existence d'un débit de base significatif ;

– des études sur les normes de conception et de dimensionnement des ouvrages, basées sur les conclusions du diagnostic rapide.

Il faudrait pour cela poursuivre dans un cadre pluridisciplinaire les recherches sur :

– l'hydrosystème bas-fond/bassin versant, en particulier la dynamique des nappes ;

– l'interaction entre description du paysage (morpho-pédologie, couverture végétale et arborée) et fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bas-fond ;

– les critères de régionalisation de ces recherches ;

– l'amélioration des techniques culturales en tenant compte de l'interaction entre dynamique de l'eau et comportement de la culture (limitée dans cette étude à ETR/ETM) en conditions hydromorphes et avec fluctuations de la nappe ;

– l'impact socio-économique de ces aménagements et les critères décisionnels permettant d'évaluer la priorité à leur donner dans le cadre d'une politique de gestion des terroirs.

Références bibliographiques

AHMADI N., DAMAY G., DIABY M., HUSSON O., TRAORE B., 1990. Projet riz inondé IER-IRAT. Rapport d'activité. Hivernage 1989. Commission technique SRCVO, IER Mali, IRAT, 53 p.

AHMADI N., DEMAY G., TRAORE B., HUSSON O., 1991. Projet riz inondé IER-IRAT. Rapport analytique Hivernage 1990. Deuxième partie. Agronomie. Système. IER Mali, IRAT, 80 p.

AHMADI N., DIABY M., 1991. Projet riz inondé IER-IRAT. Rapport analytique. Hivernage 1990. Deuxième partie. Amélioration variétale du riz. IER Mali, IRAT, 28 p.

ALBERGEL J., 1989. Rapport de mission à Ouagadougou, Bamako et Sikasso, du 13 au 14 février 1989. Programme CEE-CIRAD.

ALBERGEL J., GUIGUEN N., PARIENTE P. PEPIN Y., 1991. Projet pilote Mali-Sud, bas-fond de Kambo. Rapport de synthèse hydrologie-hydrogéologie. Programme CEE-CIRAD.

DRSPR, 1991. Synthèse des résultats de la campagne 1990-1991. DRSPR, SPR-IER.

FOREST F., REYNIERS.F.N., 1985. Propositions en termes de bilan hydrique de situations agroclimatiques de riziculture pluviale. *In :* Conférence internationale de Djakarta, Indonésie,.4-7 mars 1985, 17 p.

GADELLE F., 1989. Potentialités des aménagements hydro-agricoles pour la riziculture. CMDT, Mali CEMAGREF, 29 p.

HUSSON O., 1990. Mise en valeur des bas-fonds et plaines inondables. Le projet riz inondé IER-IRAT Sikasso. Volet Agronomie. CNEARC-ESAT-IRAT, 49 p.

KRIER D., SIMPARA M., 1990 *a*. Projet relation eau-sol-plante. Rapport d'activité. IER, 75 p.

KRIER D., SIMPARA M., 1990 *b*. Projet relation eau-sol-plante. Rapport d'activité. IER, 47 p.

KRIER D., SIMPARA M., 1990. Résumé des résultats obtenus sur le fonctionnement hydrique des bas fonds au Mali. IER.

LAMACHERE J.M., 1984. Etude hydrologique des plaines de Niena Dionkele et Foulasso Lelasso. Ouagadougou, ORSTOM, 387 p.

LAMAGAT J.P., 1979. Région de Sikasso, le Kobafini à Loudouni, débits journaliers, apports annuels, crue de projet. Bamako, ORSTOM.

LAMAGAT J.P., 1980. Région sud du Mali. Bilan des observations hydrologiques, débits spécifiques décennaux. Bamako, ORSTOM.

LIDON B., 1987. Référentiel riziculture de bas-fond. Mali- Sud. Amélioration et extension du périmètre irrigué de Klela. IRAT, 59 p.

LIDON B., SIMPARA M., 1988. Projet eau-sol-plante. Mise en valeur des bas-fonds. Résultats de la campagne 1986-1987 et proposition de programme 1988. Bamako, SRCVO, IER, 40 p.

LIDON B., SIMPARA M., COURTESSOLE P., 1988. Projet eau-sol-plante. Mise en valeur des bas-fonds. Résultats campagne 1987-1988. Bamako, SRCVO, IER, 47 p.

LIDON B., SIMPARA M., COURTESSOLE P., 1989. Projet eau-sol-plante. Rapport de campagne de mesure et d'expérimentations 1988-1989. Volet mise en valeur des bas-fonds. Bamako, SRCVO, IER.

PARIENTE P., 1990. Bassin versant de Kambo, synthèse des observations hydrologiques 1988-1990. Propositions d'une approche agro-hydraulique. Programme mise en valeur des bas-fonds. Réseau R3S, ENGREF, IRAT-CIRAD, IER, DRA, SRCVO.

ROUSSEAU V., 1991. Caractérisation d'un bas-fond de la région de Sikasso, Mali. CIRAD-CNEARC, 15 p.SANOU J., 1990. Projet Kadiolo, rapport sur le suivi rizicole 1987-1989. AFVP, 37 p.

SRCVO, 1990. Projet riz inondé IER-IRAT. Synthèse. Rapport d'activité. Hivernage 1989. IER Mali, IRAT, 5 p.

VAKSMAN M., 1990. Modèle Bipode, notice d'utilisation. Montpellier, CIRAD-IRAT.