

Des régimes hydrologiques capricieux

LES EQUIPEMENTS HYDROMETRIQUES

Sur les cinq sites du programme CCE pour la mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'ouest, un effort important a été consenti pour l'équipement hydrométrique des bassins versants.

Le climat tropical est caractérisé par une grande irrégularité spatio-temporelle des pluies qui nécessite une forte densité de postes pluviométriques. L'étude du fonctionnement des aménagements hydrauliques requiert l'installation de stations hydrologiques en amont des retenues, sur les plans d'eau et parfois en aval des aménagements. Cette double contrainte a guidé les choix techniques en matière d'équipement hydrométrique. Le tableau XIV récapitule l'état des installations en 1990.

Tableau XIV : Equipements hydrométriques des bassins versants

Sites	Superficie du bassin km ²	Piézomètres	pluvio-mètres	pluvio-graphes	stations hydrologiques	période d'observation
Projet Yatenga						
Gourga Tili	45	54	8	3	3	85-91
Roulgou Toega	95	84	13	5	4	89-91
Améné	157	87	21	7	6	85-91
Projet Siné-Saloum						
Ndiba	16.2	4	11	3	1	83-90
Keur Samba Diama	75.6	15	8	2	1	89-90
Projet Comoé						
Kawara	99.8	30	12	2	2	88-90
Damana	104	24	7	2	1	-
Maodougou	112	28	12	0	3	90
Projet Mali sud						
Kambo barrage	10	55	11	4	2	88-90
Projet Casamance						
Le Brusq	2.56	0	3	1	1	89-90
Djiguinoum	16.8	28	5	2	1	88-90
Djilakoun	24.2	64	10	3	3+1	88-90
Total		307	92	23	21	

+1 Marégraphe

Pour les projets Yatenga et Casamance, le dispositif est constitué d'un ensemble de 3 bassins emboîtés. Le plus grand bassin versant, qui englobe les deux autres, cumule tous les équipements installés. Les pluviographes ont fait l'objet de mesures pluviométriques journalières. Ils sont donc inclus dans le nombre des pluviomètres et ne doivent pas être ajoutés à ceux de la deuxième colonne. Sur le projet Casamance, les dispositifs d'évaluation des bilans hydrologiques ont été complétés par un réseau d'observation de la qualité chimique des eaux.

Sur les bassins versants du Siné-Saloum, un dispositif d'étude du bilan hydrique sur parcelle et un équipement complet de quatre ravines pour suivre l'érosion des versants complètent le réseau d'observation.

Sur les petits bassins versants, la densité des postes pluviométriques varie de 1 poste par km² pour le bassin de Kambo au sud du Mali à 1 poste pour 2 km² pour le bassin de Djilakoum en Casamance.

Sur les grands bassins versants, la densité des postes pluviométriques est d'au moins 1 poste pour 10 km². La densité maximale des pluviographes est de 1 pluviographe pour 4 pluviomètres sur la plupart des bassins, de 1 pluviographe pour 5 pluviomètres pour le projet Comoé.

La figure 22 donne un exemple d'équipement pour les études hydrologiques sur le site du Yatenga.

Le suivi hydrologique des stations

La durée des observations est très variable d'un projet à l'autre. Les projets Yatenga et Siné-Saloum ont en effet bénéficié des données hydrologiques recueillies par l'ORSTOM antérieurement au démarrage du programme financé par la CCE. J. TUINA, (1992) et H. DACOSTA, (1992) ont fait les synthèses de ces observations.

Les données hydrométriques collectées sur le bassin versant de Damana n'ont pu être exploitées faute de mesures des débits pour le tarage des stations hydrologiques. L'enregistrement automatique des hauteurs d'eau n'a pu être réalisé qu'en 1990 à la station de Moadougou.

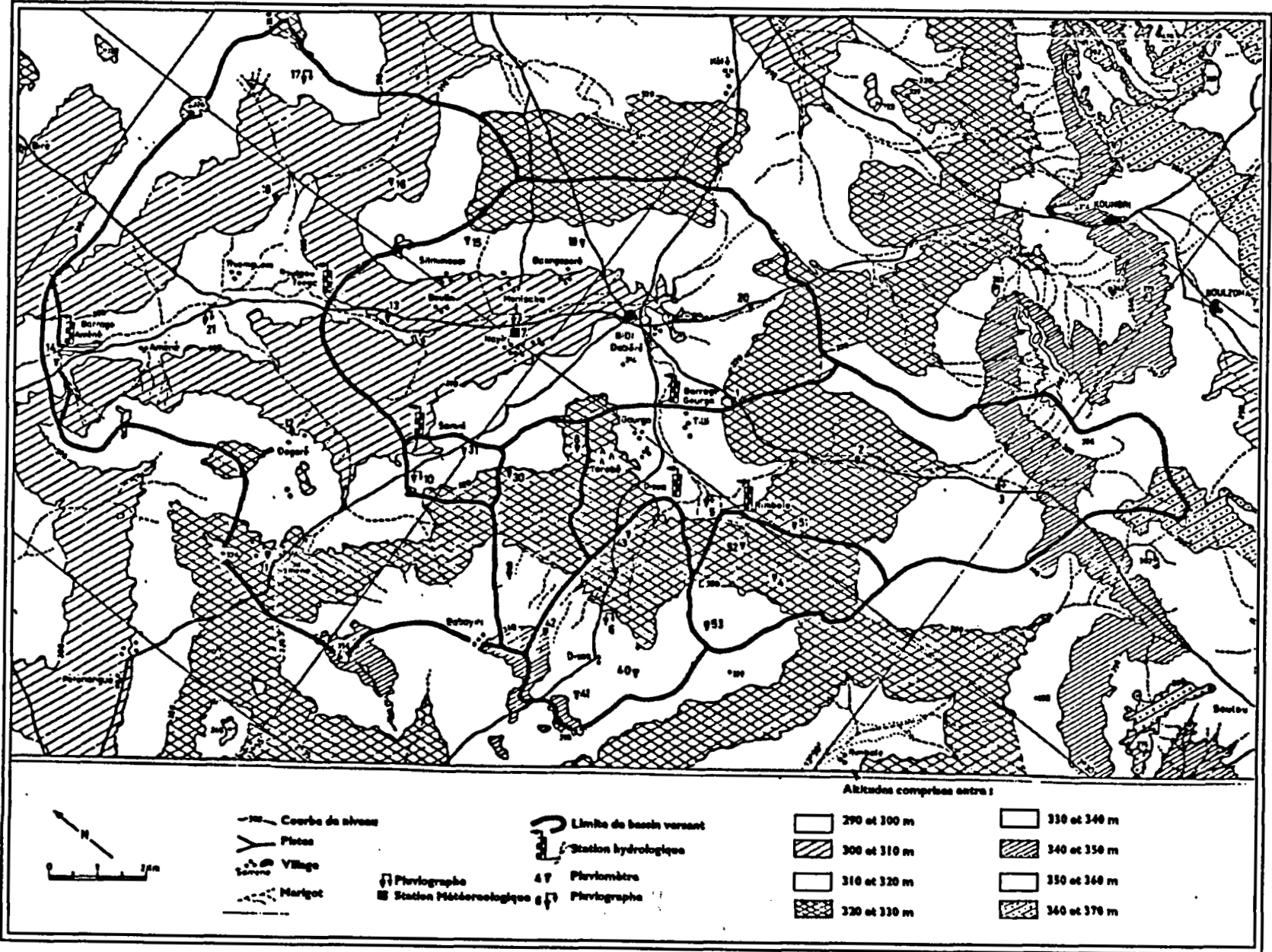


Figure 22 : Equipement hydrométrique sur le site du Yatenga.

LES RESSOURCES EN EAUX SUPERFICIELLES

APPORTS ANNUELS

Les observations :

Les tableaux XV et XVI présentent les écoulements annuels et les pluviométries annuelles sur toute la période d'observation.

Tableau XV : Apports annuels en millions de m³

Années	Yatenga		Siné-Saloum		Comoé		Mali-sud		Casamance	
	Gourga	Roulgou Toega	Ndiba	Keur Samba Diama	Kawara	Moa-dougou	Kambo amont	Kambo aval	Djigui-noum	Djilakoun
1983			0.158							
1984			0.233							
1985	1.29		0.171							
1986	1.45		0.300							
1987	1.92		0.049							
1988	0.57		0.543		>17			0.629		
1989	0.22	2.48	0.386	0.16	8.59		0.0025	0.328	1.03	1.25
1990	0.25	0.82	0.219	0.009	18.5	20.8	0.023	0.354	0.459	0.99

Les pluviométries annuelles du tableau XVI correspondent aux moyennes pluviométriques calculées sur les bassins versants par la méthode de Thiessen qui fait intervenir les aires d'influence polygonales pour chaque pluviomètre.

Tableau XVI : Pluviométries annuelles moyennes sur les bassins versants en mm

Années	Yatenga		Siné-Saloum		Comoé		Mali-sud		Casamance	
	Gourga	Roulgou Toega	Ndiba	Keur Samba Diama	Kawara	Moa-dougou	Kambo amont	Kambo aval	Djigui-noum	Djilakoun
1983			394							
1984			469							
1985	376		555							
1986	493		683							
1987	529		795							
1988	510		820		1110			1244		
1989	450	447	704	765	875		867	920	1144	1148
1990	365	350	465	495	1338	1514	1107	1103	989	1008
1991	605	602								

Toutes les stations hydrométriques ont été équipées d'échelles limnimétriques et de limnigraphes pour l'enregistrement en continu des hauteurs d'eau. Les mesures de vitesse ont été effectuées au moulinet et les jaugeages réalisés en continu selon la méthode des verticales indépendantes dans la section. Les mesures ont été dépouillées de manière identique à l'aide du logiciel HYDROM, réalisé par le laboratoire hydrologique de l'ORSTOM à Montpellier. Les courbes d'étalonnage sont présentées dans les rapports hydrologiques propres à chaque projet : rapports de campagne ou de synthèse hydrologique.

La comparaison des pluviométries annuelles, consignées dans le tableau XVI, et des pluviométries aux stations climatiques de référence (tableau VIII) permet de situer la série des observations effectuées dans le cadre du programme CCE et d'évaluer sa représentativité.

Les stations climatologiques de Ouahigouya dans le Yatenga et de Sikasso dans le sud du Mali sont malheureusement trop éloignées des sites expérimentaux pour être utilisées sans rectification. Dans le Yatenga, le gradient pluviométrique nord-sud peut être évalué à 1.67 mm par km. Le site expérimental de Bidi étant situé à 40 kilomètres au nord de Ouahigouya, la pluviométrie interannuelle observée à Bidi est inférieure d'environ 67 mm à celle de Ouahigouya. Une corrélation établie entre les valeurs observées simultanément à Ouahigouya et à Bidi, malgré une forte dispersion des points, fournit une estimation des valeurs décennale sèche, médiane et décennale humide de Bidi sur la période 1970-1990. Ces valeurs sont les suivantes:

Région de Bidi, Projet Yatenga (1970-1990)		
Pluviométrie annuelle décennale sèche	:	350 mm
Pluviométrie annuelle médiane	:	455 mm
Pluviométrie annuelle décennale humide	:	580 mm

Dans le sud du Mali, une corrélation entre les pluies annuelles à Kadiolo et à Sikasso fournit les valeurs suivantes:

Région de Kadiolo, Projet Mali-sud (1970-1990)		
Pluviométrie annuelle décennale sèche	:	650 mm
Pluviométrie annuelle médiane	:	910 mm
Pluviométrie annuelle décennale humide	:	1260 mm

Les échantillons des pluviométries annuelles observées au Yatenga et dans le Siné-Saloum semblent assez représentatifs de la période 1970-1990, l'échantillon collecté dans la région de Bidi étant légèrement plus étalé vers les années humides que l'échantillon de Thyse Kaymor, plus étalé vers les années sèches.

Les trois années observées dans la province de la Comoé et au sud du Mali sont nettement humides pour la période 1970-1990. Elles sont toutes situées au dessus de la valeur médiane, excepté 1989 dans la province de la Comoé. Sur le bassin de Moadougou, l'année 1990 doit être considérée comme exceptionnellement humide. Avec une valeur annuelle de 1514 mm, elle correspond à la valeur décennale humide de la période 1922-1969 de Banfora.

En Casamance, l'année 1989 est très proche de la valeur médiane, l'année 1990 légèrement inférieure.

Les relations lame écoulée / pluie annuelle

Les couples de valeurs lames écoulées / pluies annuelles ont été reportés sur les figures 23 et 24.

Si l'on excepte les années 1985, 1988 et 1989 sur le bassin de Gourga, années qui s'écartent très nettement de la droite de corrélation entre les lames écoulées et les pluviométries annuelles, il est possible d'établir des relations linéaires entre les lames écoulées par bassin versant.

Les relations établies dans le Siné-Saloum sur le bassin de Ndiba et dans la Comoé semblent les plus fiables en raison de la faible dispersion des points autour de la droite de corrélation et de l'étalement des totaux pluviométriques observés.

En Casamance et au sud du Mali, les valeurs pluviométriques restent trop groupées autour de la valeur médiane, ce qui limite la précision des extrapolations aux valeurs extrêmes.

Le bassin de Keur Samba Diama constitue un cas particulier par la faiblesse de ses écoulements, il est jalonné de grandes mares qui stockent une partie des ruissellements en provenance des versants. Les écoulements qui transitent par la station ne sont donc pas représentatifs des apports qui parviennent dans le bas-fond.

Le petit bassin versant de Kambo, malgré la faiblesse de ses écoulements, doit être considéré comme représentatif des petits bassins de la zone soudanienne où la nappe aquifère reste au-dessous de la surface du sol dans le bas-fond et n'alimente pas l'écoulement superficiel.

Figure 23: Relation lame écoulée pluie annuelle en zone soudano-sahélienne (Pan < 1000 mm)

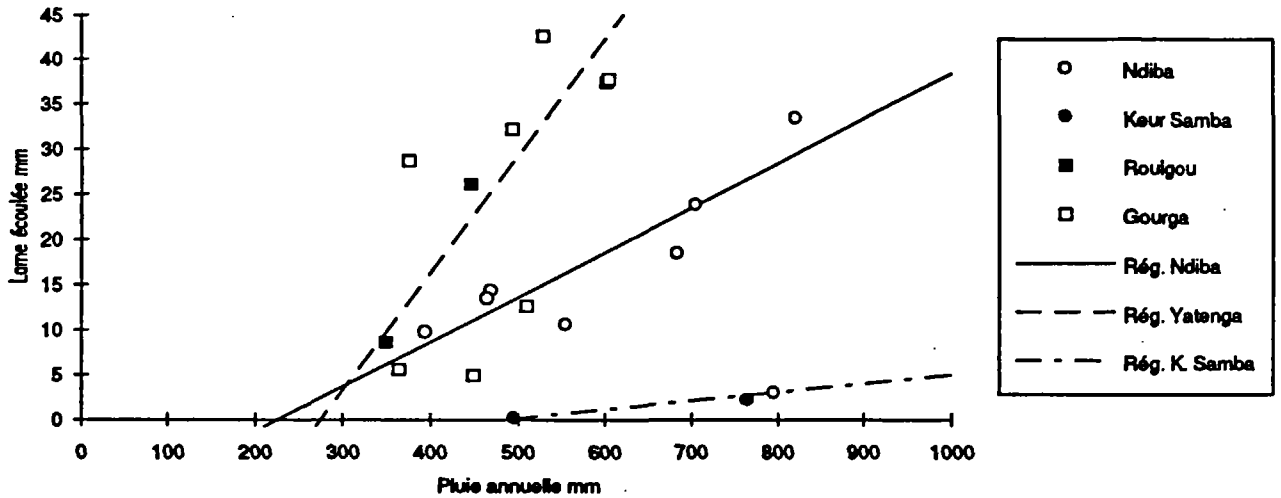
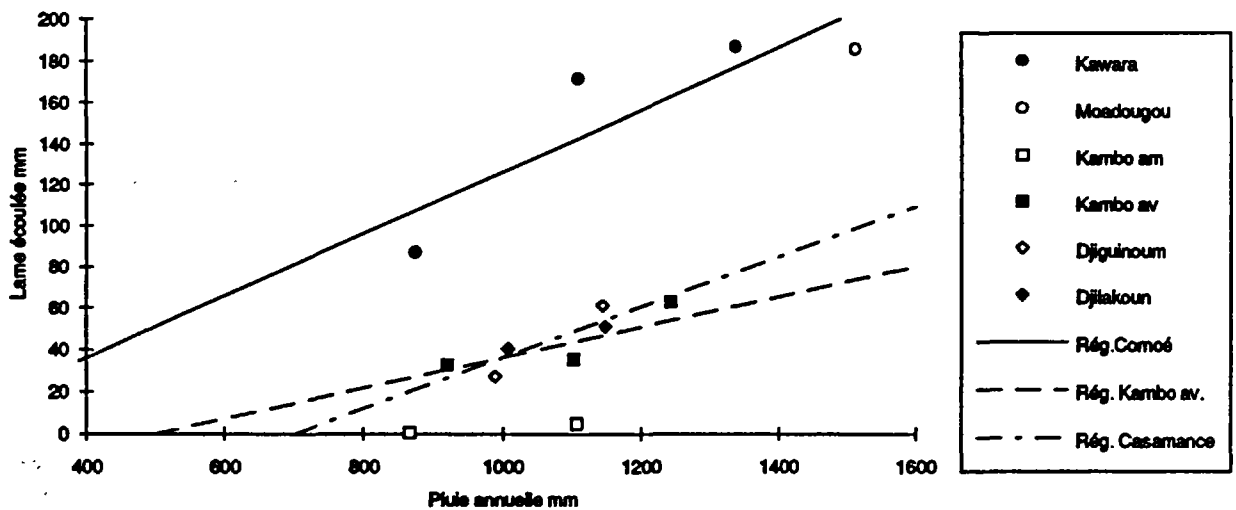


Figure 24 : Relation lame écoulée pluie annuelle en zone soudanienne et guinéenne (Pan > 1000 mm)



L'approche de la lame écoulée annuelle par une régression avec la pluie n'est qu'un moyen grossier d'estimation de la ressource en eau d'un bas-fond pour des années où la pluviométrie est de fréquence connue (Tableau XVII). L'écoulement annuel dépend du total annuel de la pluie mais également de la répartition des averses au cours de la saison, surtout sur les bassins sahéliens où l'essentiel de l'écoulement est constitué par le ruissellement immédiat.

**Tableau XVII : Apports annuels en millions de m³,
Coefficients d'écoulement, période 1970-1990.**

Bassins versants	décennale sèche		médiane		décennale humide		bassin surface en km ²
	Lame mm	Coef écoulée %	Lame en mm	Coef écoulée %	Lame en mm	Coef écoulée %	
YATENGA							
Gourga Tilli	4.2	1.4	23.4	5.2	43.2	7.0	45.0
Roulgou Toéga	7.2	2.4	27.9	6.2	48.3	8.0	95.0
SINE-SALOUM							
Ndiba	11.3	2.4	20.0	3.1	31.3	3.6	16.2
COMOE							
Kawara	88.0	11.6	120.0	12.2	148.0	12.7	99.8
MALI SUD							
Kambo amont	0.5	0.06	4.5	0.4	9.0	0.7	4.7
Kambo barrage	25.0	2.9	45.0	4.2	65.0	4.9	10.0
CASAMANCE							
Djilakoun	5.0	0.6	67.0	5.7	120.0	8.4	24.2

La part des apports souterrains dans l'écoulement superficiel

A partir des valeurs des débits moyens journaliers et en considérant les longues périodes à faible pluviométrie, nous avons séparé le ruissellement de l'écoulement de base généré par l'affleurement des nappes aquifères dans les bas-fonds. Le tableau XVIII donne les résultats obtenus.

**Tableau XVIII : Part du ruissellement et des apports souterrains
dans l'écoulement annuel des marigots.**

Bassin	Ruissellement	Écoulement de base
Yatenga	100%	0%
Siné-Saloum	100%	0%
Comoé	50 à 60%	40 à 50%
Mali-sud	20 à 40%	60 à 80%
Casamance	0 à 10%	90 à 100%

Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, seul le ruissellement est en mesure d'alimenter l'écoulement des marigots. Dans les régions ouest-africaines où la pluviométrie moyenne interannuelle est inférieure à 800 mm, le substratum imperméable doit être situé très près de la surface pour que les nappes aquifères puissent alimenter l'écoulement superficiel.

Dans la Comoé et le sud du Mali, la part de l'écoulement de base est égal ou supérieur à 40% de l'écoulement total : 45% sur les bassins versants de Kawara et Moadougou, 70% sur le bassin versant de Kambo. L'aptitude des sols à l'infiltration joue probablement là un rôle fondamental dans le processus d'alimentation des aquifères et conditionne la répartition des écoulements. En Casamance, l'absence de ruissellement superficiel concorde parfaitement avec l'absence de réseau hydrographique sur le bassin de Djilakoun.

RECONSTITUTION D'APPORTS AU PAS DE TEMPS JOURNALIER.

Pour simuler le fonctionnement d'un ouvrage hydraulique et son impact sur le bilan hydrique des cultures, il est nécessaire de générer des séries d'apports sur des pas de temps inférieurs à l'année. L'information pluviométrique étant disponible au pas de temps journalier sur de longues chroniques, il est possible de reconstituer des séries d'apports sur ce même pas de temps.

La reconstitution des débits à l'échelle journalière fait appel soit à une modélisation de type stochastique, soit à une modélisation de type déterministe. L'utilisation des statistiques permet de fournir rapidement des résultats dont la précision des estimations peut être chiffrée, mais la validité des résultats obtenus reste dépendante de la stabilité des facteurs qui conditionnent les écoulements superficiels et souterrains.

L'utilisation des modèles hydrologiques déterministes permet de faire varier les facteurs conditionnels de l'écoulement. Ils présentent des possibilités d'adaptation intéressantes.

Dans le cadre du projet CCE deux modèles hydrologiques de reconstitution de l'écoulement journalier ont été testés sur les bassins versants des projets Mali-Sud, Sine-Saloum et Yatenga. Le premier de ces modèles repose sur une relation linéaire entre la lame écoulée et la hauteur de pluie corrigée d'un terme caractérisant surtout l'état de saturation préalable des terrains. Ce terme est représenté par l'indice des précipitations antérieures (CHEVALLIER, 1983). Le réglage d'un tel modèle est rapide et possible, même avec seulement un à deux ans d'observations de débits. Le second modèle, de type déterministe est le modèle GR3 - CEMAGREF (MICHEL & EDJATNO, 1989). Un troisième modèle plus complexe a été mis en oeuvre au Yatenga. Il s'agit du modèle à discrétisation spatiale de GIRARD (1982), mais les travaux de calage ne sont pas assez avancés pour que les résultats puissent être présentés dans ce document.

Le premier modèle a donné des résultats satisfaisants sur le bassin de Ndiba dans le Sine-Saloum, tandis que le modèle GR3, calé sur trois années d'observations, a parfaitement convenu pour le bassin de Kambo dans le sud du Mali. L'ajustement d'une relation linéaire entre la lame écoulée et la pluie est d'autant plus satisfaisant que l'écoulement est généré principalement par du ruissellement, ce qui est souvent la réalité des zones les plus sèches du Sahel. Le modèle GR3, quant à lui, reconstitue très bien l'écoulement de base produit par les nappes et moins bien le ruissellement pur. Il convient aux zones de bas-fonds plus arrosées de la zone soudanienne.

Siné-Saloum, bas-fond de Ndiba

La relation entre la lame écoulée (L_e) et la pluie moyenne journalière (P_m) a été ajustée sur les observations 1983-1987 et validée sur la période 1988-1990 (figure 25). Elle s'exprime par la formule suivante :

$$L_e = 0.144 P_m + 0.112 IK - 3.75$$

Coefficient de corrélation $R = 0.73$ (30 couples de valeurs)

où IK est l'indice des précipitations antérieures

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{m_{n-1}}) e^{-0.5 \cdot t}$$

IK_n : indice des précipitations de l'événement n

$P_{m_{n-1}}$: Pluie moyenne de l'événement $n-1$

t = temps en jours entre les événements n et $n-1$

La figure 25 montre que la relation a tendance à sous-estimer les plus forts apports journaliers. La reconstitution est assez imprécise à l'échelle journalière mais devient très satisfaisante à l'échelle mensuelle ou annuelle. Une reconstitution des lames écoulées sur la période 1931-1987 à partir des pluies observées à Nioro du Rip montre que la relation pluie annuelle / lame écoulée n'est pas linéaire, mais qu'elle peut être linéarisée entre les valeurs correspondant aux récurrences décennale sèche et décennale humide (ALBERGEL & al, 1991).

La figure 26 montre les résultats de cette simulation; la droite de régression obtenue sur les valeurs observées est superposée au nuage de points. La figure 27 représente l'ajustement statistique aux lames écoulées.

Figure 25 : Ajustement d'une relation entre pluie et écoulement journaliers pour le bassin versant de Ndiba

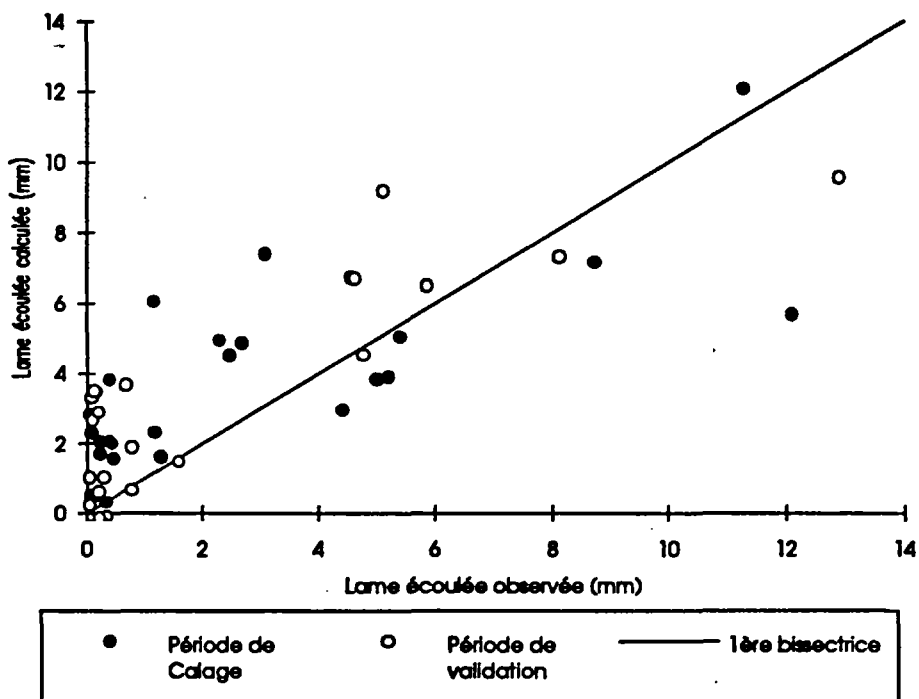


Figure 26 : Simulation des écoulements annuels. Ndiba 1931-1987

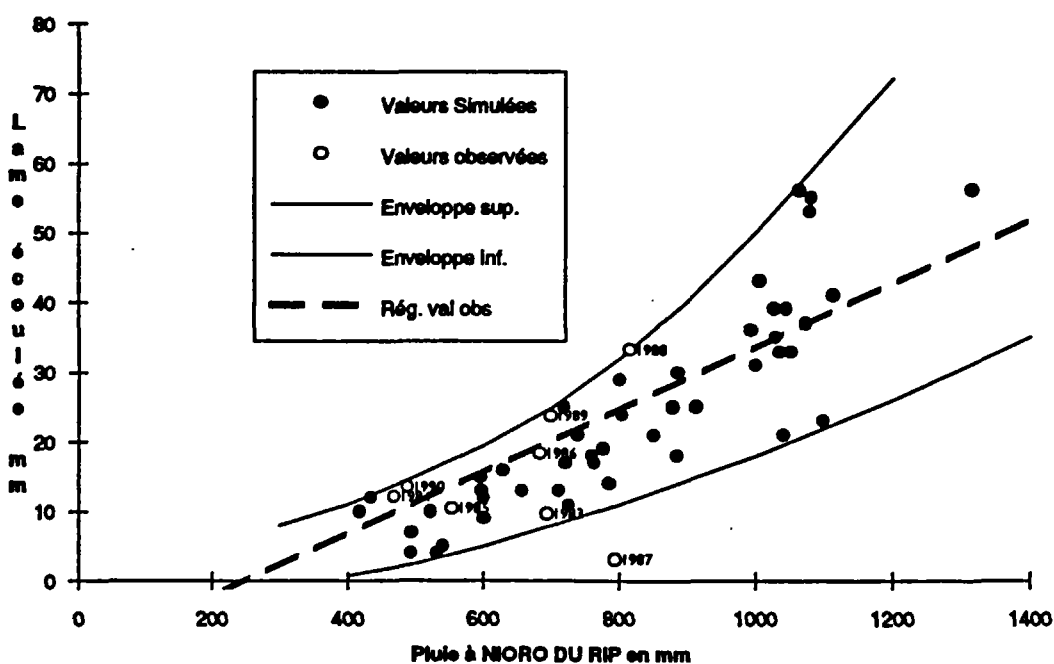
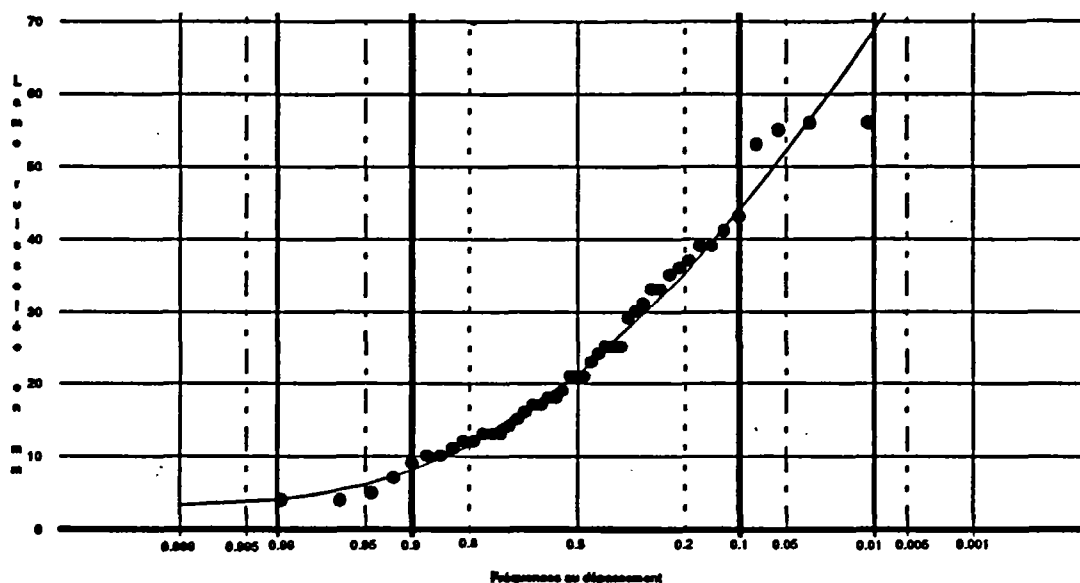


Figure 27 : Statistique des écoulements annuels. Ndiba 1931-1987



Projet Mali Sud, bas fond de KAMBO

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

- Le réservoir sol, dont la seule sortie est le prélèvement dû à l'évaporation potentielle, commande la répartition de la pluie nette (pluie diminuée de l'évaporation) entre lui même et un second réservoir. Il est caractérisé par sa capacité A, exprimée en mm, premier paramètre du modèle. Son niveau S est soumis à la pluie et à l'ETP (E-P); il permet de définir la fraction de pluie qui accèdera au second réservoir « eau gravitaire » : fraction définie par $(S/A)^2$. Le complément à 1 de cette fraction alimente le réservoir sol. L'évapo-transpiration réelle est calculée comme une fraction de l'ETP Penman qui est une fonction du niveau de remplissage du réservoir sol.

- Le réservoir eau gravitaire reçoit pour les premiers 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 (ruissellement). 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 exprimé 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 débits calculés et observés. Le modèle GR3 utilise 4 critères pour cette optimisation :

- un critère global d'appréciation, critère de NASH & SUTCLIFFE (1970),
- un critère «erreur de bilan», représentant l'erreur de l'évaluation du 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 d'étiage (calculé/observé); ces rapports doivent être proches de un.

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

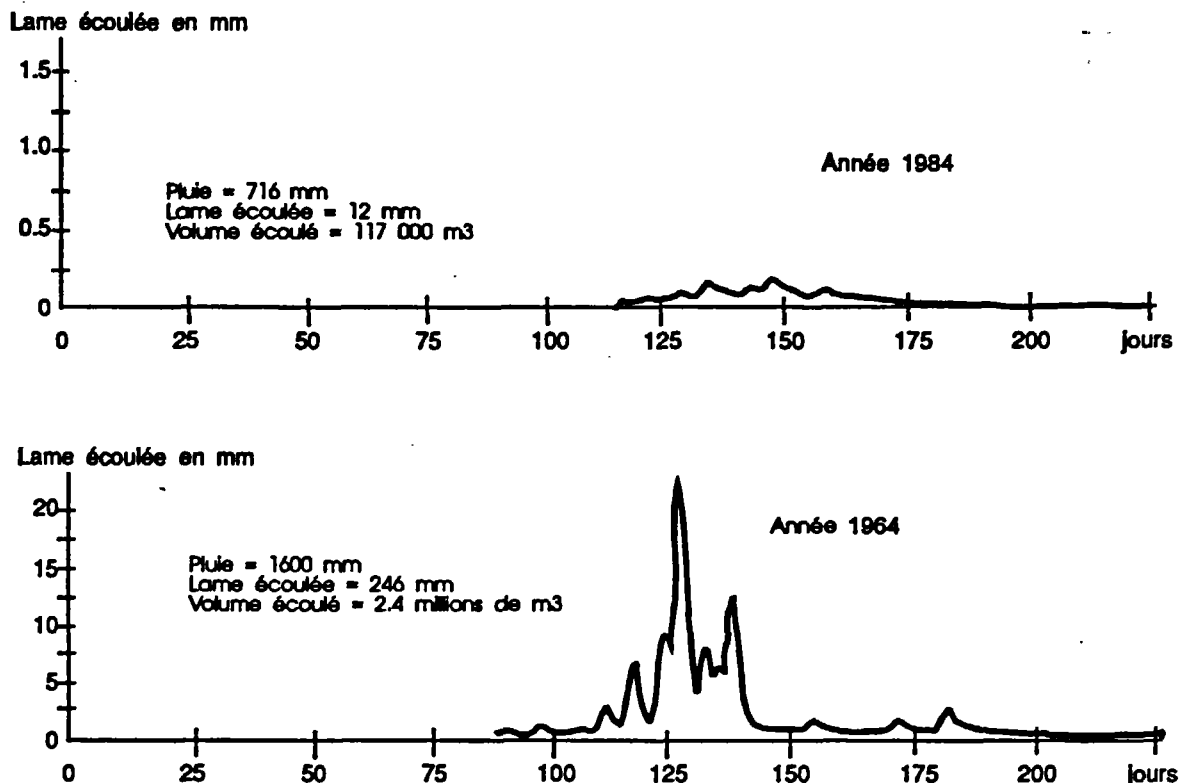
- Réservoir sol A = 478 mm
- Réservoir eau gravitaire B = 32 mm
- Hydrogramme unitaire C = 1.34 jours

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,
- confirmé par le fort rapport des durées de crue : 36 «calculées» pour 31 «observées»
- Le rapport des durées d'étiage est inversé : 459/492

Une simulation a été réalisée à partir des données de pluies journalières observées à Kadiolo (1963-1987). La figure 28 montre la simulation pour une année forte 1964 (1600 mm) et une année faible 1984 (716 mm). 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 28 : Reconstitution des apports à Kambo (années : 1964 & 1984)



LES CRUES

L'étude des crues a pour objectif principal de fournir aux projets d'aménagement hydraulique une estimation du débit maximum contre lequel on souhaite protéger l'ouvrage afin d'éviter sa destruction ou sa submersion. Lorsque l'ouvrage est de peu d'importance, sa protection n'est assurée que pour les crues de fréquences vicennale ou cinquantennale. Quand l'importance de l'ouvrage augmente ou que sa destruction peut avoir des conséquences dommageables importantes, la protection de l'ouvrage doit être assurée pour les crues de fréquence centennale voire millennale et même décennennale pour les très gros aménagements.

Les hydrologues ont pris l'habitude de se servir des crues de fréquence décennale comme base de calcul pour l'extrapolation aux valeurs extrêmes. Pour les petits bassins versants sur lesquels on ne dispose généralement que de peu d'années observées, ce choix est pleinement justifié. Nous chercherons donc avant toute chose, dans le cadre de cette étude des crues, à caractériser les crues de fréquence décennale sur tous les bassins versants afin de fournir les éléments d'une régionalisation des paramètres hydrologiques liés à la définition des crues exceptionnelles. Les caractéristiques de ces crues sont fournies dans le tableau XIX

Tableau XIX : Crues de fréquence décennale sur les bassins

	Surface en km ²	T _m heure	T _b heure	P moy mm	Kr %	Q _{moy} m ³ /s	Q _{max} m ³ /s	a
YATENGA								
Gourga Tilli	45.0	2.5	9	78	20	22	47.5	2.2
Roulgou Toéga	95.0	3	22	73	16	14	40	2.9
SINE-SALOUM								
Ndiba	16.2	1	3	97	22	30	60	2.0
Keur Samba D.	75.6	3	6	87	26	80	160	2.0
COMOE								
Kawara	99.8	3	16	93	15	24	36	1.5
Moadougou	112.0	3	16	92	20	36	59	1.6
MALI SUD								
Kambo amont	4.7	3.5	8	105	5	0.86	1.7	2.0
Kambo barrage	10.0	7	24	100	10	1.16	2.3	2.0
CASAMANCE								
Le Brusq	2.56	1.25	4	154	8.6	2.4	7.2	3.0
Djiguinoum	16.8	5	30	138	3.6	0.76	1.9	2.5
Djilakoun	24.2	10	37	136	7	1.73	4.3	2.5

T_m = Temps de montée, T_b = Temps de base, P_{moy} = Pluie moyenne sur le bassin versant, Kr = Coefficient de ruissellement, Q_{moy} = débit moyen, Q_{max} = débit de pointe
a = Coefficient de forme (Q_{max}/Q_{moy})

Les paramètres qui caractérisent la durée de la crue, sa forme et sa puissance sont déterminés à partir des fortes crues observées sur les 5 sites expérimentaux. Une attention particulière a été accordée à la détermination des temps de base qui conditionnent l'estimation des débits moyens et du coefficient de forme, rapport du débit maximum au débit moyen. Les temps de base sont fréquemment sur-estimés car il est difficile de déterminer l'arrêt du ruissellement qui se confond d'autant mieux avec l'écoulement de base que celui-ci est important. En règle générale, les valeurs du coefficient de forme des crues se situent entre 2 et 3. Lorsqu'il s'est révélé nettement supérieur à 3, nous avons procédé à une relecture des hydrogrammes de crue.

L'examen des crues observées sur les bassins versants montre que les fortes crues sont peu nombreuses. Les bassins versants de Gourga au Yatenga, Ndiba dans le Siné-Saloum, Kawara et Moadougou dans la Comoé, Le Brusq en Casamance ont connu des crues proches de la fréquence décennale pendant la période d'observation. Sur un total de 33 années d'observation, tous sites confondus (10 bassins), il a été observé 5 fois un événement proche de l'événement décennal.

Le choix du coefficient de ruissellement de fréquence décennale pose cependant un problème qui n'est pas toujours facile à résoudre quand les coefficients de ruissellement observés présentent des valeurs très différentes. Les coefficients de ruissellement indiqués sur le tableau XIX sont légèrement supérieurs (ou égaux) aux valeurs maximales observées sur les bassins à l'occasion des crues les plus fortes. Une exception a été faite pour le bassin de Ndiba où le coefficient de ruissellement de la crue du 17 juin 1989 est égal à 49%. Il est difficile d'oublier cette valeur exceptionnellement forte qui coïncide vraisemblablement, au tout début de la saison des pluies, avec des états de surface cultivée particulièrement aptes au ruissellement. Les bassins versants très cultivés peuvent ainsi réserver quelques surprises désagréables et il n'est pas rare que des aménagements antérieurs à leur mise en culture voient leurs ouvrages de protection sous-dimensionnés pour la période actuelle.

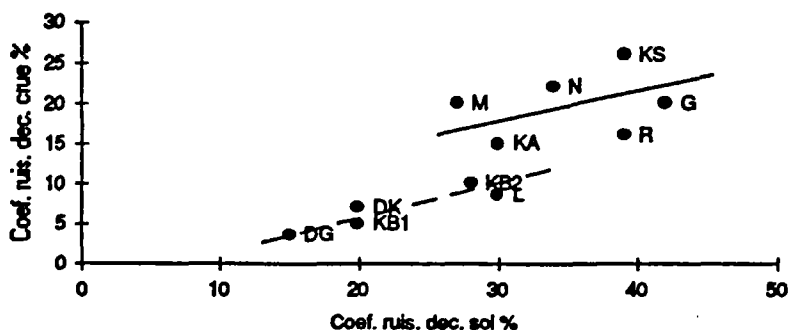
Le tableau 20 compare les estimations des coefficients de ruissellement décennaux obtenus à partir de l'étude des crues et celles calculées à partir de l'analyse des cartes de l'occupation des sols (tableau XIII). La seconde estimation est toujours plus forte que la première. On peut attribuer cette différence aux pertes dans le réseau hydrographique. La figure 29 met en évidence deux familles de bas-fonds :

- Les réseaux hydrographiques constitués principalement par un bas-fond large, sans lit mineur qui caractérisent les bassins de Casamance et du sud Mali.
- Les réseaux hydrographiques bien hiérarchisés, dendritiques avec une tendance radiale en amont qui caractérisent les bassins des projets Comoé, Yatenga et Siné-Saloum.

Tableau XX : Comparaison des coefficients de ruissellement de fréquence décennale

Projets	Coefficients de ruissellement calculés à partir :		Projets	Coefficients de ruissellement calculés à partir :	
	des unités paysagiques	des crues observées		des unités paysagiques	des crues observées
YATENGA Gourga T. Roulgou T.	42	20	MALI-SUD Kambo amont Kambo barrage	20	5
	39	16		28	10
SINE-SALOUM Ndiba Keur S.Diama	34	22	CASAMANCE Le Brusq Djiguinoum Djilakoun	30	8.6
	39	26		15	3.6
				20	7
COMOE Kawara Moadougou	30	15			
	27	20			

Figure 29 : Comparaison des coefficients de ruissellement décennaux



QUALITE DES EAUX DE SURFACE

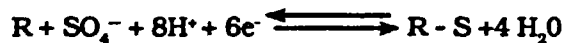
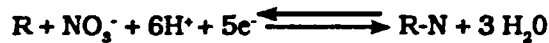
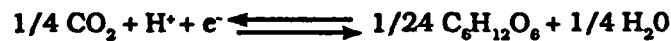
Deux projets pilotes ont réalisé des observations sur la qualité des eaux de surface dans leurs bas-fonds. En Casamance, la qualité chimique des eaux est la contrainte majeure au développement de la riziculture de bas-fond : salinité, ions ferrique et aluminique toxiques pour les cultures. Dans le Siné-Saloum, les forts taux de sable dans les sédiments apportés par les crues limitent les possibilités d'aménagement. Sur les trois autres projets, la qualité des eaux de surface ne pose pas de problème aux aménagements ou aux cultures.

CHIMIE DES EAUX EN CASAMANCE

La qualité des eaux de surface a été suivie pendant 3 années en fonction des exigences agronomiques. D'une part, la salinité, provenant des sels accumulés dans les sédiments lorsque la vallée était ouverte à la marée et des infiltrations marines qui sont toujours possibles au-dessous de la digue, a fait l'objet de mesures régulières. D'autre part, des mesures de pH et des analyses des ions majeurs présents dans l'eau ont été réalisées pour déterminer les niveaux de toxicité ferrique et aluminique pour la culture du riz.

Dans ce milieu très riche en matière organique, les micro-organismes dégradent cette matière en libérant des électrons e^- et des ions H^+ . Ces électrons et ces ions réagissent avec la matière minérale (argile) et des ions métalliques sont libérés dans l'eau.

Les équations chimiques de dégradation de la matière organique peuvent s'écrire simplement sous la forme :



(R étant un radical organique)

Bilan salin

Les mesures de conductivité et de pH ont été réalisées lors de chaque lâcher au barrage, afin d'estimer le poids de sels évacués de la plaine. Ce suivi montre qu'il est possible d'évacuer de grandes quantités de sels au cours d'une saison des pluies. En 1989, par exemple, la salinité des eaux du barrage a baissé d'environ 20 mS/cm (13 g/l) à 2 mS/cm (1g/l) (figure 30). Un bilan pondéral a été établi pour chaque année de l'étude (tableau XXI). En 1988, une seule vanne était fonctionnelle, et les règles de gestion n'étaient pas encore suivies. La salinité est obtenue à partir de la conductivité par la relation suivante :

Salinité (g/l) = $0.5089 \times CE^{1.070}$ (mS/cm) (relation établie statistiquement sur 15 échantillons d'eau de mer $R^2 = 0.999$) (MONTOROI, 1991).

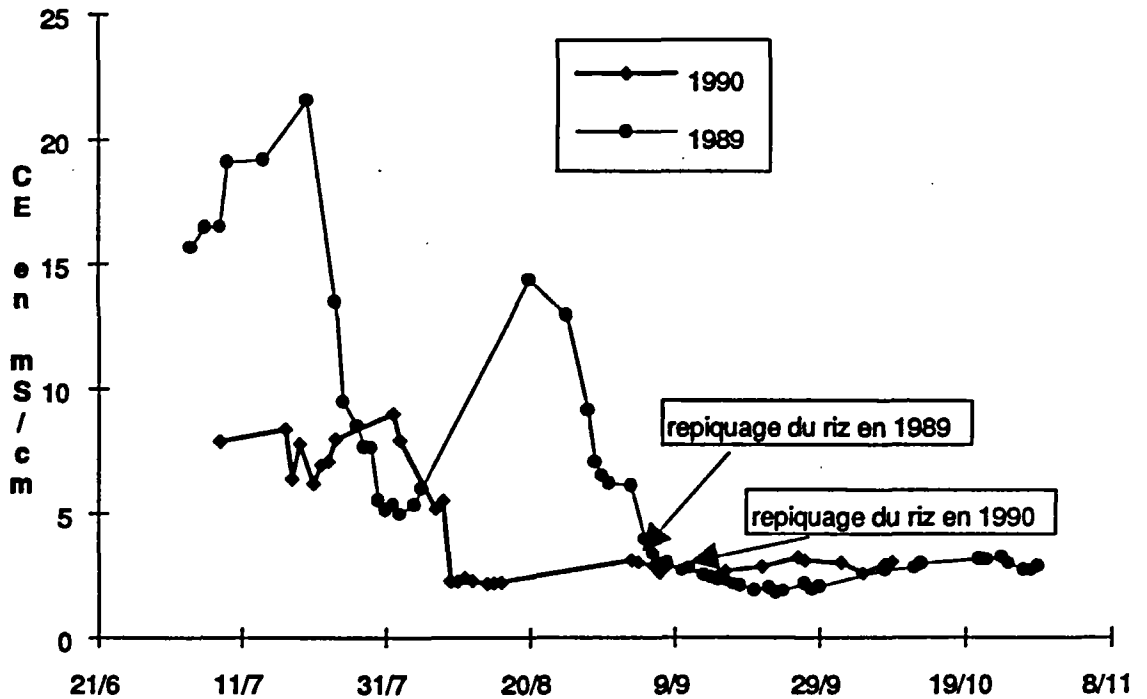
Tableau XXI : Bilan du sel évacué de la vallée de Djiguinoum

Année	Nb lâchers	Volume d'eau m3	Masse totale de sel Tonnes	Masse de sel T/ha
1988	24 (1 vanne)	215000	315	2.03
1989	55 (3 vannes)	1026062	2234	14.41
1990	34 (3 vannes)	741900	1409	9.09

NB: le volume par hectare est une moyenne indicatrice sur l'ensemble des sols du bas-fond, la répartition des sels n'étant pas homogène sur tous les sols.

Une période de sécheresse durant la saison des pluies fait remonter rapidement la concentration en sel de la retenue (seconde décade d'août 1989). Une très forte pluie en début de saison abaisse significativement la conductivité. Le repiquage du riz a été réalisé lorsque la salinité des eaux de la retenue est descendue entre 1 et 1.5 g/l.

Figure 30 : Evolution de la conductivité des eaux de la retenue de Djilakoun en 1989 et 1990



Suivi des éléments dissous

Durant la saison des pluies, l'acidité des eaux varie peu, le pH passe de 2.7 à 3.8. Les variations de teneur en ions dissous s'expliquent surtout par la dilution et l'évacuation lors des lâchers. Les légères variations du pH peuvent également avoir une influence en déplaçant les équilibres chimiques présentés ci-dessus. L'acidité des sols diminue avec leur submersion (le pH passe à une valeur légèrement supérieure à 4). Les variations des éléments dissous ont été suivies chaque année dans les eaux de la retenue. Les graphiques 31 et 32 donnent en exemple l'année 1990.

Figure 31 : Composition ionique des eaux de la retenue du barrage de Djlakoun, 1990

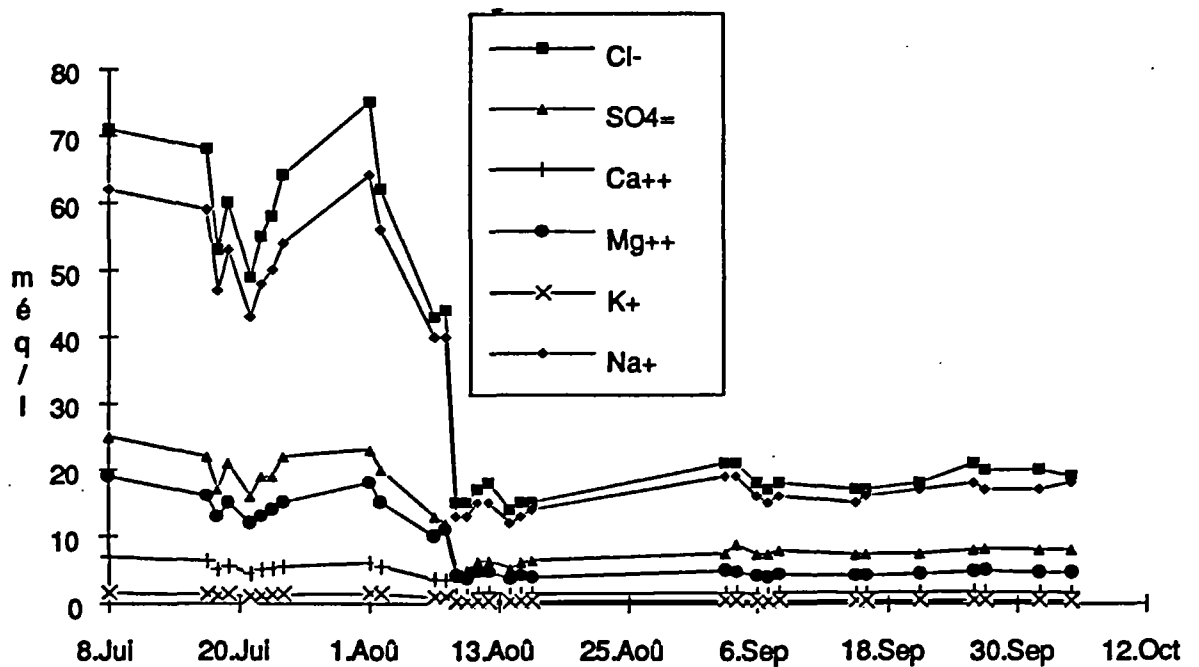
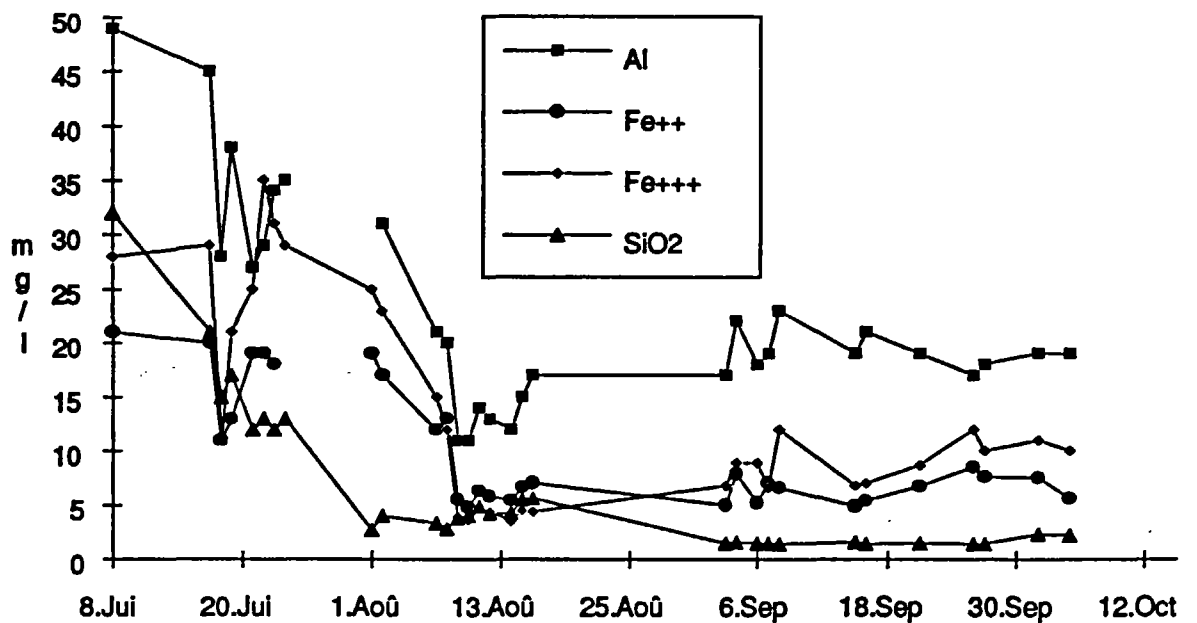


Figure 32 : Teneur en aluminium, fer et silice des eaux de la retenue du barrage de Djlakoun, 1990



La teneur de l'ensemble des éléments dissous chute dans les 5 premières semaines de la saison des pluies. De légères augmentations ont lieu pendant les périodes de sécheresse. Pour les éléments toxiques du riz, les taux des éléments toxiques pour le riz passent de plus de 50 mg/l en début de remplissage de la retenue à 15-20 mg/l avant la date du repiquage pour l'aluminium total et de 30 mg/l à 5-10 mg/l pour le fer ferreux.

TRANSPORTS SOLIDES DANS LE SINE-SALOUM

Une contrainte à la mise en valeur des bas-fonds au Sine-Saloum est constituée par les apports en matériaux arrachés aux versants par l'érosion. Quatre ravines dont les bassins versants varient de 2.5 ha à 90 ha ont été équipées d'un dispositif de mesure du ruissellement et de l'érosion (fosse à sédiments et mesure des matières en suspension). Avant aménagement anti-érosif, les apports en matières solides ont été évalués à 1.5 t/ha, dont 12 % sont formés de sables grossiers se déposant en cônes de déjections dans le bas-fond. Les concentrations maximales de matières fines en suspension varient entre 20 et 30 g/l et surviennent un peu avant le maximum des premières fortes crues. Ces concentrations diminuent au fur et à mesure que la végétation s'installe durant l'hivernage. La figure 33 montre l'évolution du débit solide durant une forte crue dans une ravine dont le bassin a une superficie de 58 ha.

Les problèmes d'érosion et d'aménagements anti-érosifs ont été étudiés dans le cadre du programme "Economie de l'eau, défense et restauration des sols" qui a donné lieu à plusieurs publications dont on peut citer : ALBERGEL & al, (1990), et RUELLE & al,(1990).

Figure 33 : Transports liquides et solides d'une ravine drainant 58 ha (Keur Dianko) - Crue du 13/07/88

