

RÉGIONALISATION DES PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES À PRENDRE EN CONSIDÉRATION POUR L'AMÉNAGEMENT D'UN BAS-FOND RIZICOLE DANS L'ESTUAIRE DE LA CASAMANCE (SÉNÉGAL)

J. ALBERGEL¹, H. DACOSTA², Y. PÉPIN¹

RÉSUMÉ

L'aménagement d'un petit bas-fond nécessite la connaissance d'un minimum de paramètres caractérisant son fonctionnement hydrologique. La prédétermination, plus ou moins précise, de ces paramètres, permet de prendre une décision sur le type d'aménagement à réaliser, de dimensionner les ouvrages de génie rural et d'élaborer les règles de la gestion des eaux. À partir des données climatiques observées en Casamance, des mesures effectuées sur le réseau de marégraphes et des études menées sur des bassins versants représentatifs, les auteurs de cette communication ont élaboré des méthodes simples d'utilisation pour estimer les paramètres de la ressource en eau, de la crue de projet, des amplitudes de marée et du fonctionnement des nappes d'eau souterraines superficielles. La précision des estimations obtenues par ces méthodes est suffisante à la construction de petits barrages anti-sel dans des bas-fonds dont la superficie varie de la dizaine d'hectares au km² et dont la durée de vie espérée est de l'ordre de quinze ans.

¹ Hydrologues DEC, UR. 2B

² Assistant de l'Université C.A.D, Chercheur associé, Centre Orstom de Dakar Hann

INTRODUCTION

Dans les bas-fonds estuariens, les aménagements ont d'abord pour but de protéger les rizières contre la salinisation. Traditionnellement, les paysans construisaient des petites diguettes isolant les rizières des eaux marines. La pluie, combinée avec les ruissellements, suffisait à dessaler le sol et à permettre le repiquage du riz sur billons (PÉLISSIER, 1966).

Tous les systèmes impliquant une irrigation intensive avec drainage ont été des échecs : dès que le sol est exondé, l'acidité se développe, engendrant des éléments toxiques (aluminium, fer) qui provoquent un déséquilibre dans l'alimentation minérale du riz (ILACO, 1967).

L'aménagement type qui s'est montré performant consiste à construire une digue entre la rizière et la mer, résistant aux plus hautes marées (USAID, SOMIVAC, ISRA, 1985 ; ALBERGEL *et al.* 1991 a). Un ouvrage bétonné, muni d'un dispositif d'ouverture de fond (vanne), permet le stockage des eaux de ruissellement et l'évacuation des eaux lessivant les sols salés au début de la saison des pluies. Les règles de gestion de l'ouvrage sont simples :

- on limite la hauteur maximale de l'eau dans la rizière à moins de 50 cm, compatible avec le riz rustique ;
- les ruissellements remplissent la plaine en début de saison des pluies ;
- dès que le niveau dans la plaine atteint la cote maximale, on ouvre les vannes de l'ouvrage au moment des marées basses. Pour être sûr que l'écoulement a bien lieu de la plaine vers la mer, on fait en sorte de n'ouvrir les vannes que lorsque le niveau de la mer est d'au moins 3 cm inférieur à celui dans la plaine. On arrête la vidange si le niveau a baissé de 5 cm dans la plaine ;
- à partir d'août, les sols sont suffisamment dessalés pour permettre le repiquage du riz. Celui-ci est ensuite récolté dans l'eau en fin de saison des pluies.

L'énorme succès qu'ont connu les petits aménagements anti-sel durant ces dernières années, que ce soit en Casamance, ou plus au sud dans les estuaires des fleuves de Guinée Bissau, nous a poussé à proposer des méthodes simples pour l'estimation des paramètres hydrologiques nécessaires à la conception de ces ouvrages (ALBERGEL, 1988 ; ALBERGEL, 1990). Ces méthodes sont basées sur la régionalisation des paramètres observés.

Lors de la conception d'un ouvrage anti-sel, l'hydrologue devrait déterminer les paramètres suivants :

- **ressource pluviométrique** : une statistique des pluies à l'échelle annuelle et à l'échelle journalière sur un poste de longue durée proche du site à aménager donne les paramètres d'entrée aux méthodes de prédétermination de la ressource en eau ;
- **ressource annuelle en eau** : la détermination du coefficient annuel d'écoulement est suffisante pour estimer les surfaces possibles à mettre en culture en admettant que 80 % de la ressource sera évacuée pour dessaler les terres ;
- **crue d'étude** : la prédétermination de la crue décennale permet de savoir si l'ouvrage d'évacuation des eaux est suffisamment dimensionné et si la construction d'un évacuateur de crue supplémentaire est nécessaire ;
- **amplitudes extrêmes des marées** : la prédétermination des amplitudes extrêmes des marées permet de définir la hauteur de l'ouvrage d'évacuation et la hauteur de la digue à protéger contre le battement de la marée ;
- **fonctionnement de la nappe et qualité des eaux souterraines** : détermination des surfaces sous l'influence des résurgences de la nappe des plateaux.

DONNÉES ET MÉTHODES

La régionalisation des paramètres climatiques est présentée sous forme de carte des pluviométries annuelle, moyenne, décennale humide et décennale sèche. Une autre carte présente les pluies maximales journalières de récurrence sur dix ans. Les données utilisées pour la réalisation de ces cartes proviennent de trente-deux stations pluviométriques homogénéisées et complétées sur la période commune 1951-1980 (DACOSTA, 1989) (figure 1). La méthode d'homogénéisation des précipitations employée est celle du vecteur régional de (BRUNET-MORET, 1980). Les ajustements statistiques aux pluviométries annuelles ont été réalisés à partir du logiciel Dixlois (LEBEL, 1987) sur les dix-sept stations possédant plus de trente années d'observation. La loi d'ajustement est choisie au sens du test statistique de (BRUNET-MORET, 1977). La figure 2 montre l'ajustement des lois de Gauss et de Goodrich aux valeurs des pluies annuelles à Ziguinchor. La loi statistique Pearson 3 a été ajustée sur les chroniques des pluies journalières suivant la méthode préconisée par (BRUNET-MORET, 1971) et automatisée. Ces données servent d'entrée aux méthodes d'estimation des paramètres hydrologiques utiles au dimensionnement des ouvrages de génie rural.

L'étude des pluviométries journalières de sept stations a permis de présenter les dates de début et de fin de la saison des pluies pour 25, 50 et 75 % des années en fonction de leur éloignement à la mer (représenté par la longitude). Ces données sont utiles aux choix des variétés cultivées (longueur du cycle, calendrier cultural). Pour définir le début et la fin de la saison des pluies, la même démarche a été suivie : on a éliminé les jours de pluie isolés, séparés du corps de la saison des pluies de huit jours secs au moins lorsque le jour de pluie isolé a reçu 25 mm au plus ; douze jours secs au moins lorsque le jour isolé avait reçu 30 mm au plus.

Les observations hydrologiques faites sur petits bassins versants représentatifs ont été comparées à leurs caractéristiques morphométriques. Cette comparaison a permis d'élaborer des méthodes simples de prédétermination des apports annuels, des paramètres de la crue décennale, et un schéma de fonctionnement des nappes de bas-fond qui permet de délimiter les zones où la riziculture en eau douce est possible. Le tableau 1 donne la liste des bassins versants où le bilan hydrologique a été observé et les résultats ont été utilisés dans ce travail. Par bassin continental, on entend un bassin versant où l'écoulement n'est pas influencé par la marée et par bassin maritime, un bassin dont le lit mineur est envahi par les eaux marines pendant le flot.

Tableau 1
Liste de bassins versants utilisés dans l'étude de régionalisation

Nom du bassin	Type de bassin	Surface en km ²	Période observée	Références
DJINANYOE	C	11	1966/67	Brunet Moret (1970)
TANKORON	C	43	1966/67 & 70/71	Brunet Moret (1970) Olivry et Chouret (1981)
DJANGO	C	135	1966/67 & 70/71	Brunet Moret (1970) Olivry et Chouret (1981)
SINDIAN	C	11,9	1970/71	Olivry et Chouret (1981)
SANDOUGOU	C	85,7	1970/71	Olivry et Chouret (1981)
TOUKARA	C	324	1979/88	Gallaire (1980) Olivry et Dacosta (1984) Saos et al (1987)
V. LE BRUSQ	C	2,56	1989/90	Marieu et al (1991)
DJIGUINOUM	M	16,8	1988/90	Albergel et al (1990)
DJILAKOUN	M	25,2	1988/90	Albergel et al (1990)

C = bassin continental, M = bassin maritime

Les données marégraphiques sur le bief maritime de la Casamance sont répertoriées dans la banque de donnée Hydrom (l'informatisation des données archivées par le service hydrologique de la Direction Générale du Génie Rural et de l'Hydraulique est en cours). Les amplitudes entre les points extrêmes de marée sont calculées. Les amplitudes maximales et minimales des marées journalières ont été mises en relation avec la distance depuis l'embouchure (méthode déjà utilisée par BRUNET-MORET, 1970). Un aménageur peut déterminer les amplitudes des marées en tout point de la Casamance à partir de cette relation et avoir une bonne estimation du batillage en aval de la digue anti-sel qu'il projette.

LA RESSOURCE PLUVIOMÉTRIQUE

LA PLUVIOMÉTRIE ANNUELLE

Les hauteurs des précipitations annuelles se caractérisent par leur variabilité dans le temps et dans l'espace, phénomène vivement ressenti en période de sécheresse mais souvent masqué par les valeurs moyennes. Les paramètres à prendre en compte pour un petit aménagement rizicole sont les hauteurs des pluviométries annuelle, moyenne, décennale sèche, décennale humide et les dates probables de début et de fin de saison des pluies.

La figure 3 montre la disposition des isohyètes interannuelles sur le bassin de la Casamance. Leur orientation est ouest nord-ouest/sud-est. L'ensemble du bassin est situé entre les isohyètes 1 000 mm au nord et 1 600 mm au sud.

À l'exception de Inhor, de Kolda et de Sédhiou, les lois statistiques qui s'ajustent le mieux aux séries observées sont des lois de distribution hyponormales dont la concavité des courbes est légèrement tournée vers l'axe des fréquences (loi de Goodrich ou loi de Galton). Une distribution gaussienne convient aux stations de Inhor et de Kolda, tandis qu'une distribution de Goodrich, avec une concavité tournée vers l'axe de la pluviométrie s'ajuste aux données de Sédhiou. La figure 4 montre les courbes isovaleurs des précipitations annuelles de fréquence décennale sèche et décennale humide. Des relations entre la valeur de la pluie moyenne et les pluies décennales ont été recherchées à partir des dix-sept postes qui ont fait l'objet de l'étude statistique :

$$P_{decs} = 0,646 P_{moy} + 69,6 \quad r = 0,963 \quad nb = 17$$

$$P_{dech} = 1,280 P_{moy} + 30,8 \quad r = 0,988 \quad nb = 17$$

où :

- P_{decs} = pluviométrie annuelle de récurrence décennale sèche ;
- P_{dech} = pluviométrie annuelle de récurrence décennale humide ;
- P_{moy} = pluviométrie annuelle moyenne ;
- r = coefficient de corrélation et nb = nombre de stations.

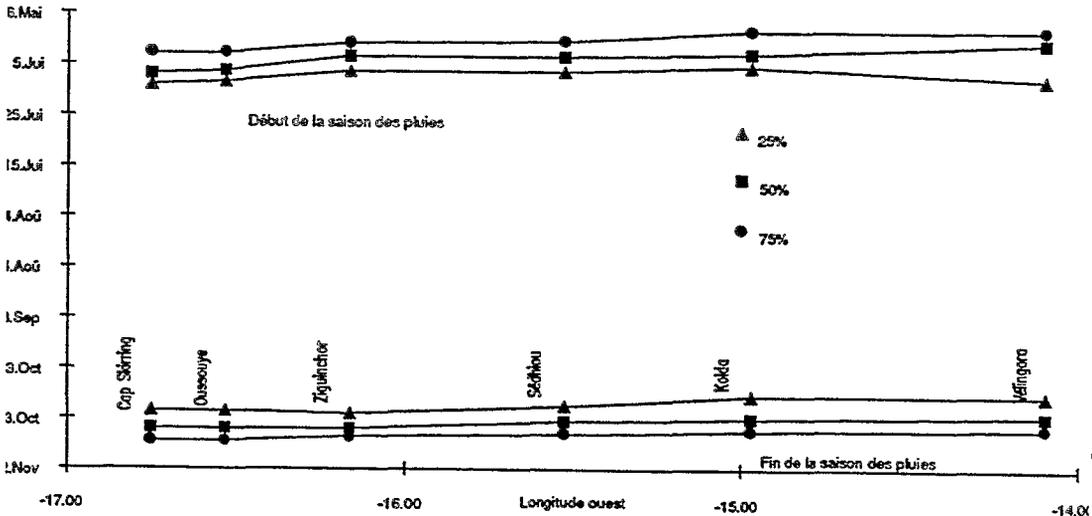


Figure 5
Début et fin de la saison des pluies

LA PLUVIOMÉTRIE MAXIMALE JOURNALIÈRE

La figure 6 donne les courbes d'égalité hauteur des précipitations journalières d'occurrence une fois tous les dix ans. La distribution des averses journalières extrêmes d'Oussouye et Diouloulou rend bien compte des fortes précipitations reçues par la basse Casamance. Une hauteur de pluie journalière de 180 mm serait attendue tous les 10 ans. En moyenne et haute Casamance, les très fortes averses sont plus exceptionnelles. L'averse décennale serait de l'ordre de 135 mm aux postes de Sédhiou, Tanaf et Kolda. La position des courbes d'isovaleurs de l'averse décennale suit celle des isohyètes annuelles. Nous avons cherché une relation entre l'averse décennale et la moyenne interannuelle, cette dernière variable étant plus facilement accessible pour un projet d'aménagement. La régression linéaire n'est pas satisfaisante : le coefficient de corrélation est de 0,60 pour 24 couples de valeurs et il est préférable de prendre une valeur moyenne en fonction de la pluviométrie interannuelle donnée par le tableau 2.

Tableau 2
Valeur de la pluviométrie journalière de récurrence décennale

Pluviométrie inter-annuelle	Pluie journalière de récurrence décennale (mm)
Entre les isohyètes 1600/1500 mm	180
Entre les isohyètes 1500/1400 mm	155
Entre les isohyètes 1400/1300 mm	145
Entre les isohyètes 1300/1200 mm	135
Entre les isohyètes 1200/1100 mm	125
Entre les isohyètes 1000/1100 mm	120

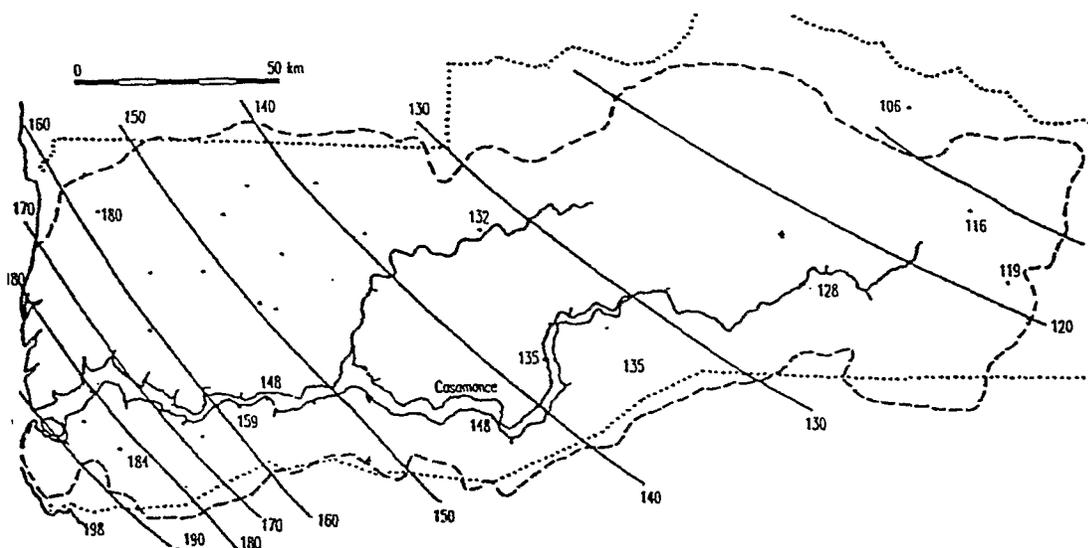


Figure 6
*Courbes d'égale hauteur de précipitations journalières
d'occurrence une fois tous les dix ans*

RÉGIONALISATION DE L'ÉCOULEMENT

RÉGIONALISATION DES PARAMÈTRES DE LA RESSOURCE ANNUELLE

L'étude statistique des lames écoulées sur les bassins versants strictement continentaux a montré que le coefficient d'écoulement annuel ne varie guère avec la surface du bassin (pour des bassins dont la superficie varie entre 10 et 1 000 km²) (DACOSTA, 1989). Les valeurs retenues pour les coefficients d'écoulement sont les suivantes :

- Ke = 0,17 % en année décennale sèche ;
- Ke = 6 % en année médiane ;
- Ke = 10 % en année décennale humide.

Dans l'étude des bassins versants maritimes du marigot de Baïla, (GALLAIRE, 1980) propose d'exprimer l'écoulement annuel par la composition d'un coefficient d'écoulement sur les plateaux continentaux, déterminé à partir de la station la plus en amont et non influencée par la marée (Toukara), et d'un coefficient d'écoulement moyen estimé, pour toutes les zones basses, à 80 %. Dans une étude de synthèse sur l'écoulement des petits bassins maritimes de basse Casamance, LAMAGAT et LOYER (1985 in USAID/SOMIVAC/ISRA) écrivent que les apports en eau douce peuvent être estimés en année moyenne en adoptant un même coefficient d'écoulement de 80 % pour les zones basses et de 5 à 6 % pour les zones de plateau. Pour évaluer la ressource en eau douce de ces bass-fonds, (ALBERGEL, 1988) applique à onze sites faisant l'objet d'une étude de faisabilité d'un ouvrage anti-sel, la formule suivante :

— Le (décennale sèche)	$= (0,002 * P_s * (S_b - S_{zi}) / S_b) + (0,8 * P_s * S_{zi} / S_b)$
— Le (médiane)	$= (0,06 * P_m * (S_b - S_{zi}) / S_b) + (0,8 * P_m * S_{zi} / S_b)$
— Le (décennale humide)	$= (0,1 * P_h * (S_b - S_{zi}) / S_b) + (0,8 * P_h * S_{zi} / S_b)$

P_s , P_m et P_h sont respectivement les pluviométries annuelles de fréquence 0,1, 0,5 et 0,9 (mm), S_b est la surface du bassin (km²), S_{zi} est la surface inondable (km²).

L'application de cette méthode au bassin versant de Djiguinoum et de Djilakoun donne les résultats suivants :

	Pluie	DJIGUINOUM	DJILAKOU
Le (décennale sèche)	1010 mm	35,2 mm	53,6 mm
Le (médiane)	1437 mm	48,7 mm	76,3 mm
Le (décennale humide)	1862 mm	63,1 mm	98,9 mm

On peut comparer ces résultats aux observations de 1989 (année de fréquence 0,2 ; 1 145 mm de pluie) et de 1990 (année de fréquence 0,1 ; pluviométrie 1 000 mm) sur les bassins maritimes de Djigoum et de Djilakoun.

	Pluie	DJIGUINOUM	Pluie	DJILAKOUN
1989	1144 mm	61,1 mm	1148 mm	51,8 mm
1990	989 mm	27,3 mm	1008 mm	40,9 mm

Cette méthode donne une bonne approximation pour les années déficitaires. Des observations en années plus humides devraient permettre une vérification de la méthode.

RÉGIONALISATION DE LA CRUE D'ÉTUDE

La méthode d'estimation des crues décennales de (RODIER et AUVRAY, 1965) est couramment utilisée pour la prédétermination des crues dans les projets de faisabilité des barrages anti-sel. Elle a été validée par rapport aux observations sur les bassins de Sindian et de Sandougou par (OLIVRY et CHOURET, 1981) et sur le bassin de Toukara par (GALLAIRE, 1980). Pour l'ensemble des petits bassins de Casamance, les clefs d'entrée pour cette méthode sont les suivantes :

- on choisit les abaques correspondant au climat : « régimes tropicaux et tropicaux de transition » ;
- les classes de relief sont à choisir entre R2 et R3 en fonction des pentes des interfluves (R2 pour des pentes inférieures à 0,5 % et R3 pour des pentes comprises entre 0,5 et 1 %) ;
- les classes de perméabilité sont à choisir entre P3 et P4 (P3, si les plateaux sont plutôt cultivés ou si les parties basses dépassent 10 % de la surface totale du bassin, P4 si les interfluves sont plutôt boisés ou si les parties basses représentent moins de 10 % de la surface totale du bassin ;
- la valeur de la pluie décennale est celle calculée à Ziguinchor (158,8 mm), elle est multipliée par un coefficient d'abattement qui est fonction de la surface du bassin.

L'application de cette méthode donne les résultats consignés dans le tableau 3. Une comparaison avec les résultats observés montre une bonne adéquation de la méthode pour le bassin continental de la vallée Le Brusq. Par contre, la crue de projet estimée pour les bassins maritimes ne correspond pas au débit à évacuer par l'ouvrage, dans la mesure où l'ancien bief soumis à marée en amont du barrage va jouer le rôle de réservoir amortisseur ; elle en est tout au plus la limite supérieure (pour l'événement décennal). L'évacuation des crues devient un problème de gestion en fonction des niveaux maximaux que

l'on se fixe en amont (cultures) et des niveaux à l'aval de l'ouvrage (marée haute ou basse). Le volume de la crue est surestimé, les temps de montée et de baisse de la crue sont sous-estimés.

Tableau 3
Crue d'étude, la méthode Rodier et Auvray

Bassin	Kec	Keo	Vol. C	Vol. O	T.Mc	T.Mo	Tbc	Tbo	Qc	Qo
	%	%	m ³	m ³	h:mn	h:mn	h:mn	h:mn	m ³ /s	m ³ /s
LE BRUSQ	15	11	49000	36000	0:45	0:45	5:00	3:55	8,1	7,2
DJIGUINOUM	13	2,4	275000	50000	3:00	5:00	20:00	30:00	9,9	1,9
DJILAKOUN	12	6,9	366000	210000	4:00	10:00	25:00	36:00	10,6	5,2

Kec et Keo = coefficient d'écoulement Rodier et Auvray observé ;
 Vol.c et Vol.o = volume écoulé Rodier et Auvray observé ;
 T.Mc et T.Mo = temps montée Rodier et Auvray observé ;
 Tbc et Tbo = temps de base Rodier et Auvray observé ;
 Qc et Qo = débit maximal Rodier et Auvray observé.

La description physiographique détaillée des bassins versants sert à connaître leur aptitude au ruissellement et à définir différentes aires contributives de l'écoulement. Pour les petits bassins de Casamance, six unités de paysage peuvent être retenues :

- les zones humides comprenant les bas-fonds ;
- les sols cultivés sur versants ou plateaux ;
- les jachères récentes ;
- la végétation ligneuse dense ;
- la végétation ligneuse claire ;
- les sols nus.

Chaque unité paysagique correspond à un ensemble d'états de surface élémentaires au sens de (CASENAVE et VALENTIN, 1989) et il est possible de lui attribuer un coefficient de ruissellement pour l'averse décennale à partir d'un protocole de simulation de pluies (tableau 4).

(ALBERGEL *et al.*, 1992) montrent qu'il est possible d'estimer le coefficient de ruissellement de la crue décennale sur le bassin à partir de la composition des coefficients de ruissellement de chaque unité paysagique proportionnellement à son taux d'occupation sur le bassin (figure 7).

Tableau 4
Coefficient de ruissellement de l'averse décennale
pour les différentes unités paysagiques

	Zones humides bas-fond	Culture sur versant	Jachères	Végétation		
	%	%	%	dense %	clair %	sol nu %
DJILAKOUN	6	15	10	32	37	0
Estimation du coefficient de ruissellement décennal	0,8	0,4	0,2	0,1	0,1	0,8

La relation entre les coefficients d'écoulement entre « unité paysagique » et « bassin » est :

$$K_{eb} = 0,38 K_{eup} - 1,76 \quad r = 0.913 \quad (5 \text{ bassins})$$

Cette relation est du même ordre de grandeur que le coefficient de calage moyen donné par (RODIER, 1992) entre les lames ruisselées reconstituées par la méthode simulateur et les lames ruisselées observées sur les bassins perméables (0,40-0,50).

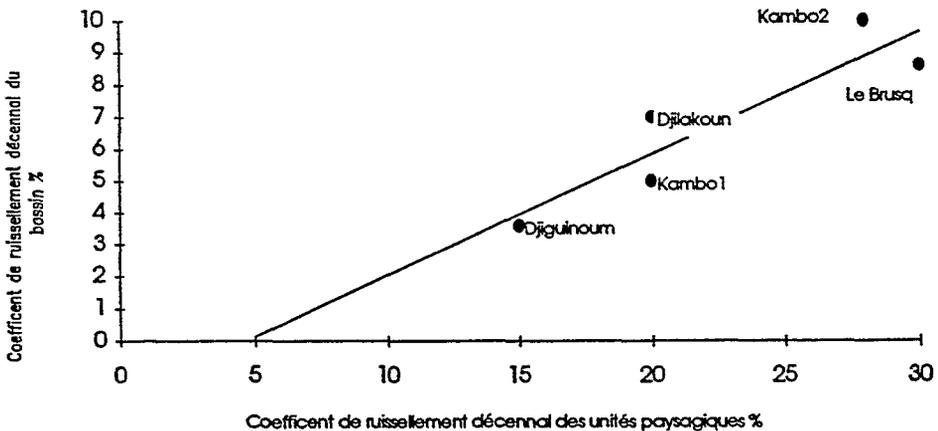


Figure 7

Estimation du coefficient de ruissellement d'un bassin à partir des unités paysagiques

Le tableau 5 donne les caractéristiques des crues décennales pour tous les bassins où elle a pu être déterminée à partir d'observations (méthode de l'hydrogramme unitaire ou adoption d'une crue observée comme crue d'étude). À partir de ce tableau, il a été possible de proposer un abaque pour l'estimation des paramètres de la crue décennale (figures 8 et 9).

Tableau 5
Crues décennales, caractéristiques observées

Bassin	Surface	SBF	Volume	T.M	T.base	Q.max	Q.s.max	Ke
unité	Km ²	Km ²	m ³	heure	heure	m ³ /s	l/s/Km ²	%
TOUKARA	324	0	2494800	20h	84h	16,8	52	8
SINDIAN	11,9	0	206600	4h30	24h	7,65	640	14
SANDOUGOU	85,7	0	720000	11h	70h	8,3	100	8
DJILAKOUN	25,2	1,55	210000	10h	36h30	5,22	174	6,9
DJIGUINOUM	16,78	0,67	50000	5h	30h	1,9	108	2,4
LE BRUSQ	2,56	0	36000	0h45	3h55	7,2	2667	11,2

SBF = surface en bas-fond ; TM = temps de montée ;
Q max et Qs max = débits et débits spécifiques maximaux.

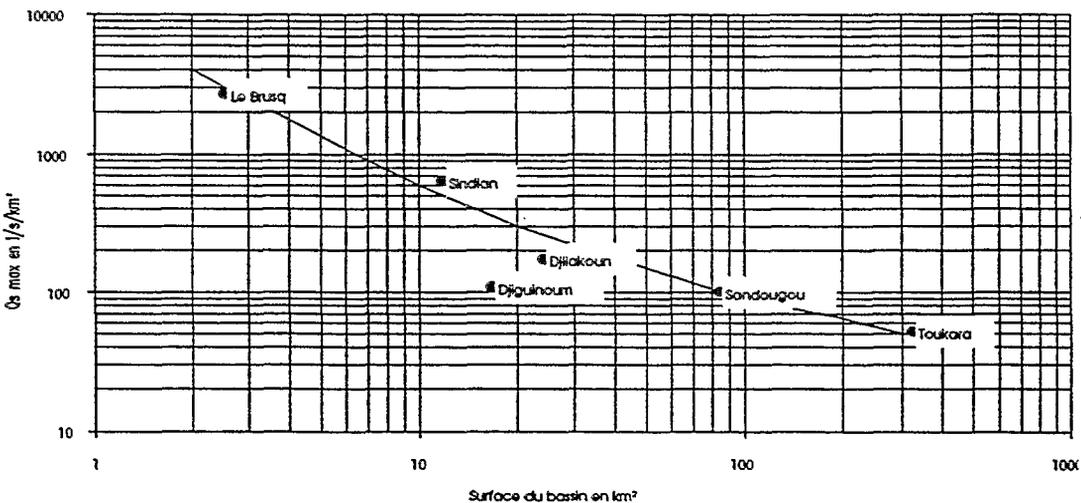


Figure 8
Abaque de prédétermination des débits spécifiques

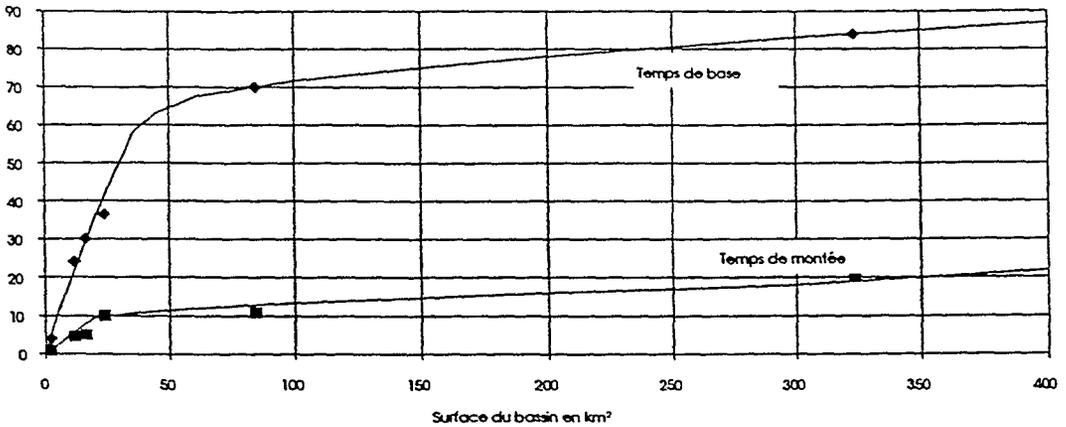


Figure 9

Abaque de prédétermination des temps caractéristiques de la crue décennale

RÉGIONALISATION DES PARAMÈTRES DE MARÉE

L'onde de marée qui se produit devant l'embouchure d'un fleuve donne naissance à une onde dérivée qui remonte le fleuve vers l'amont. Il s'agit d'un phénomène hydraulique beaucoup plus complexe que celui de la marée qui est à son origine, car le débit fluvial, la pente et la forme du lit, interviennent.

En assimilant l'onde de marée pénétrant dans un fleuve à une onde de translation, sa vitesse de propagation est, dans une section donnée :

$$v = (g(H+h))^{1/2} - u$$

avec :

- g : intensité de la pesanteur ;
- H : profondeur moyenne dans la section pour $h = 0$;
- h : hauteur de l'onde ;
- u : vitesse moyenne dans la section du débit d'eau douce.

On voit, d'après cette formule, que la propagation de l'onde de marée est maximale à marée haute et minimale à marée basse, d'où une déformation systématique de l'onde qui perd la forme quasi-sinusoidale qu'elle avait à l'embouchure. En principe, la durée du flot diminue, celle du jusant augmente.

L'amplitude de la marée diminue lorsque l'onde remonte vers l'amont, car cette amplitude est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie que possède l'onde et qui diminue par frottement pendant sa translation. Cependant, un resserrement des rives peut provoquer localement des amplitudes de marées supérieures à celles qui s'observent dans le bassin élargi à l'aval.

La marée a été suivie durant les deux années 89 et 90 en aval de la digue de Djilakoun. La marée haute journalière la plus forte atteint la cote 72 cm IGN et la marée basse la plus faible la cote -5 cm IGN. La durée moyenne de la marée montante est de 6 h 30 et celle de la marée descendante est de 5 h 55. Les vitesses de translation sont plus rapides à marée basse qu'à marée haute, ce qui est en contradiction avec la formule de translation de l'onde dans l'embouchure d'un fleuve, énoncée ci-dessus. Les frottements diminuant l'énergie de l'onde de marée, et par suite, sa vitesse de translation, sont bien plus importants à marée haute, du fait des vastes zones envahies et occupées en partie par les palétuviers, qu'à marée basse où ces frottements se limitent aux berges du lit mineur du marigot. Ce coefficient de frottement ou de freinage à appliquer à la vitesse maximale possible de l'onde est plus déterminant que la variation de hauteur. En 1981, CHOURET et OLIVRY observent le même phénomène sur le marigot de Bignona où la vitesse de propagation de l'onde de marée est plus forte pendant le jusant (5,8 m/s) que pendant le flot (3,2 m/s) dans tout le bief médian.

Le décalage horaire moyen entre la marée à Diogue au bord de l'océan et la station de Djilakoun est de 4 h 10, ce qui correspond à une vitesse de propagation de l'onde de marée de 19,5 km/h (1 600 km/h environ dans l'océan). Les amplitudes et la propagation des marées annuelles et semi-mensuelles n'ont pas été étudiées (étant moins importantes dans l'étude et la conception des ouvrages anti-sel).

À partir du réseau de marégraphes du fleuve Casamance, les amplitudes maximales et minimales de la marée ont été mises en relation avec la distance depuis l'embouchure. Un aménageur peut déterminer les hauteurs des marées en tout point de la Casamance à partir de ce graphique (figure 10).

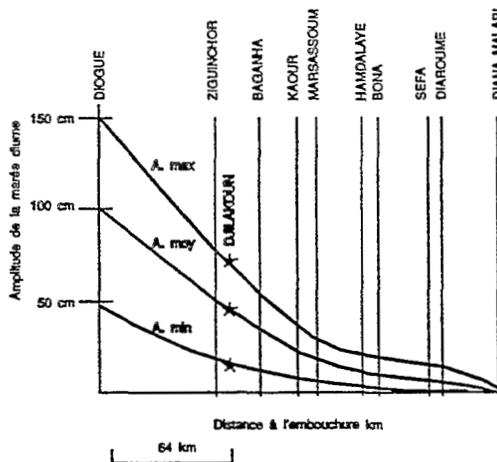


Figure 10

Abaque de prédétermination des amplitudes de marée

SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DE LA NAPPE PHRÉATIQUE SOUTERRAINE DES BAS-FONDS DE CASAMANCE

Cette étude ne concerne que la nappe superficielle qui a été observée à Djiginoum et pour laquelle nous avons des données pour d'autres bas-fonds (MALOU, à paraître).

La nappe superficielle se trouve dans les différentes formations mises en évidence par la géomorphologie : sables rouges des plateaux, couche latéritique de la base des sables rouges, sables des terrasses. Le niveau imperméable est constitué par les argiles jaunes du Continental Terminal.

L'observation des cartes piézométriques réalisées sur quelques vallées de Casamance permet de tirer les grandes lignes du fonctionnement de la nappe superficielle :

- la surface piézométrique reflète fidèlement la morphologie du terrain avec des gradients très faibles sous la surface des plateaux et une accentuation de la pente vers les versants ;
- le marigot draine la nappe dès les premières pluies importantes; la ligne de contact entre l'aquifère et le bas-fond drainants suit toutes les ramifications des marigots ;
- de part et d'autre des lignes de séparation des eaux, la largeur de la nappe qui s'écoule est relativement faible, l'aquifère général se subdivise en éléments longilignes étroits et sinueux ;
- les eaux souterraines douces s'écoulent vers les affluents latéraux sur la quasi-totalité des berges et « rivalisent » sur un front continu avec les eaux salées. Les rizières d'eau douce longent toutes les berges ;
- dans la partie amont, l'écoulement vient des plateaux durant toute l'année, tandis qu'en aval, on remarque un drainage des parties les plus basses du bas-fond vers la zone de contact avec les plateaux en saison sèche. Il se forme alors un fort creux piézométrique sous les terrasses alluviales.

Les eaux douces des plateaux se mélangent aux eaux plus salées sous les terrasses alluviales ; sous le lit mineur du marigot ce mélange devient imperceptible. Dans tout le bas-fond, il existe un fort gradient de la salinité dans la nappe, et la tranche de l'aquifère qui subit un adoucissement est d'autant plus réduite que l'on s'approche du marigot. La figure 11 schématise le fonctionnement des eaux souterraines superficielles des petits bassins versants.

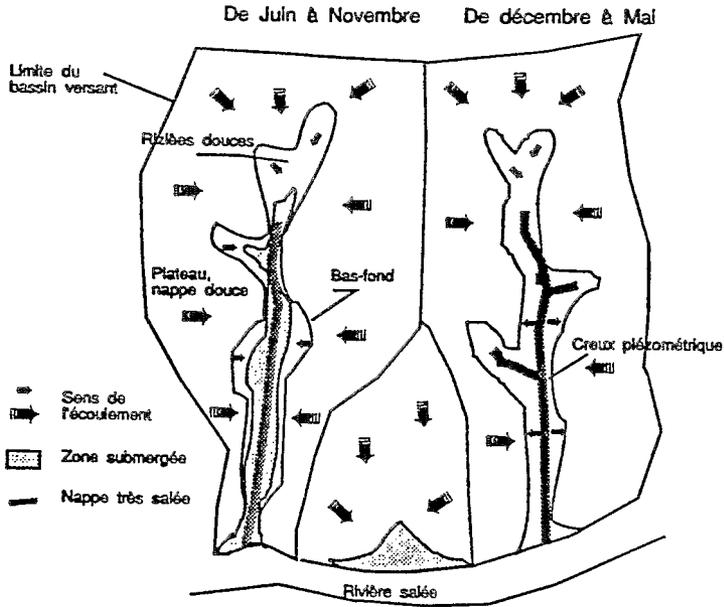


Figure 11

Schéma de fonctionnement de la nappe souterraine

CONCLUSION

Cette contribution montre comment il est possible de tirer profit de l'ensemble de l'information hydrologique existante dans une région pour proposer des méthodes d'estimation simples des paramètres nécessaires à la conception de petits ouvrages. Nous nous sommes mis à la place d'un technicien d'un organisme de développement (service national, société de développement, ONG, etc.) qui projette l'aménagement d'un bas-fond rizicole en basse Casamance et qui a accès à un minimum de données. Il connaît les pluviométries annuelles de la station climatologique la plus proche de son projet, les surfaces et les occupations du sol dans le bassin versant où il travaille. Il peut alors estimer par étapes successives les pluviométries caractéristiques sur son bassin, les écoulements annuels moyen, décennal sec et décennal humide dans le bas-fond, les paramètres de la crue d'étude, l'amplitude maximale de la marée en aval de son barrage et les limites des apports en eau douce par les nappes de plateau. Ces méthodes ont été validées en basse Casamance, elles restent à être vérifiées en moyenne Casamance. Par analogie, en changeant les données

climatiques, elles ont été utilisées dans les estuaires plus arrosés de Guinée Bissau, mais elles devraient être confrontées à des mesures de terrain (ALBERGEL et PÉPIN, 1991).

En procédant de la même façon, une méthode de régionalisation des paramètres hydrologiques utiles à la conception des barrages semi-souterrains dans les petits bas-fonds du Sud du Mali a été mise au point (ALBERGEL et *al.*, 1991 b).

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL J., 1988 - Hydrological survey of 11 sites in the lower and middle Casamance. 25, annex G.1.d *in* Southern Zone Water Management, Paper Project, USAID (685-0295).

ALBERGEL J., 1990 - Une méthode « expert » pour la conception des barrages dans les bas-fonds de basse et moyenne Casamance. Séminaire « Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance », 22-26 octobre 1990, Ziguinchor (Sénégal), 13 p.

ALBERGEL J., BRUNET D., DUBET G., MARIEU B., MONTOROI J.P., PÉPIN Y., ZANTE P., 1991a - Projet Pilote « Casamance », Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : Hydrologie - Hydrogéologie.

ALBERGEL J., GUIGUEN N., PARIENTE P., PÉPIN Y., 1991b - Projet Pilote « Mali-Sud », Bas-fond de Kambo. Rapport de synthèse : Hydrologie - Hydrogéologie.

ALBERGEL J., LAMACHÈRE J.M., LIDON B., 1992 - Mise en valeur des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles (à paraître).

ALBERGEL J., PÉPIN Y., 1991 - Étude d'évaluation et inventaire des ressources en eau de la Guinée Bissau, rapport de synthèse, projet GBS/87/002, programme des nations unies pour le développement en coopération technique, Dakar, 132 p.

BRUNET-MORET Y., 1970 - Études hydrologiques en Casamance, rapport définitif. 52 p, figures et tableaux.

- BRUNET-MORET Y., 1971 - Fonction de distribution en développement limité. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol. VIII, n° 1.
- BRUNET-MORET Y., 1977 - Test d'homogénéité. *Cah. Orstom, Série Hydrologie*, vol. XIV, n° 2.
- BRUNET-MORET Y., 1980 - Retour sur l'homogénéisation des pluies annuelles par vecteur régional. *Météorologie*, VI^e série, n° 20-21.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne. Éd. de l'Orstom, collection Didactiques, 227 p.
- CHOURET A., OLIVRY J.C., 1981 - Étude hydrologique du marigot de Bignona, quelques aspects intéressants des mesures réalisées en 1970-1971, 93 p.
- DACOSTA H., 1989 - Précipitations et écoulement sur le bassin de la Casamance. Thèse UCAD.
- GALLAIRE R., 1980 - Étude hydrologique du marigot de Baïla, 104 p.
- ILACO, 1967 - Aménagements hydro-agricoles en Casamance. Rapport de gestion des casiers pilotes de Médina et Diéba, juillet 1965-juillet 1967. Ministère de l'économie rurale, Sénégal, 126 p.
- LAMAGAT J.P., LOYER J.Y., 1985 - Typologie des petits bassins versants de basse Casamance, in « Actes de la II^e table ronde sur les barrages anti-sel », 12-15 juin, Ziguinchor.
- LEBEL T., BOYER J.F., 1987 - Notice d'utilisation du Logiciel Dixloi. Un ensemble de programmes Fortran pour l'ajustement des lois statistiques et leur représentation graphique.
- MALOU R., 1992 - Étude des aquifères superficiels en basse Casamance : bilan hydrique. Thèse UCAD, Dakar/Orstom, 116 p.
- OLIVRY J.C., DACOSTA H., 1984 - Le marigot de Baïla, bilan des apports hydriques et évolution de la salinité, campagnes 1980-1983, 145 p.
- PÉLISSIER, 1966 - Les paysans du Sénégal. Imprimerie Fabrègue, St Yrieux.

RODIER J., 1992 - Du simulateur de pluie aux bassins représentatifs sahéliens. Coll. Études et Thèses, Orstom Paris.

RODIER J.A, AUVRAY C., 1965 - Estimation des débits des crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale. Paris, Orstom-CIEH, 44 p.

SÂOS J.L., DACOSTA H., LE TROQUER Y., OLIVRY J.C., 1987 - Le marigot de Baïla (basse Casamance), pluviométries et écoulements (résultats des campagnes 1983-1986), 49 p.

SOMIVAC/USAID/ISRA, 1985 - Actes de la II^e table ronde sur les barrages anti-sel, Ziguinchor, 12-15 juin 1985.