

LES PARAMETRES HYDROLOGIQUES REGIONAUX

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

Pour dimensionner un aménagement de bas-fond, il faut pouvoir donner une estimation de l'écoulement en années moyenne, forte et faible, prédéterminer les paramètres de la crue d'étude, et, en zone influencée par la marée, fournir les amplitudes maximales de celle-ci.

L'aménageur qui ne peut pas réaliser d'étude hydrologique faute de temps, de moyens, ou tout simplement parce que l'aménagement projeté ne nécessite pas une connaissance précise des paramètres de la ressource en eau, peut soit utiliser des méthodes générales de prédétermination, soit tirer profit des études hydrologiques régionales.

En Afrique de l'Ouest deux méthodes de prédétermination de la crue d'étude et deux méthodes de prédétermination de l'écoulement annuel sont largement utilisées par les concepteurs d'aménagements :

- Méthodes de prédétermination de la crue d'étude

- La méthode de RODIER & AUVRAY (1965) permet de déterminer les paramètres de la crue de récurrence décennale sur un petit bassin versant tropical, de superficie comprise entre 10 et 200 km², en comparant ses caractéristiques physiographiques à celles de bassins étudiés. La clef de cette méthode est une typologie des petits bassins versants intertropicaux qui conduit l'utilisateur à des abaques donnant le volume de la crue, ses temps caractéristiques et son débit de pointe.

- La méthode CIEH (PUECH & CHABI GONNI, 1984) est basée sur une approche probabiliste. Des formules résultant de régressions multiples permettent de prédéterminer les paramètres de la crue décennale à partir de la surface, de l'indice de pente du bassin et de la pluviométrie inter-annuelle. Cette méthode calée essentiellement sur des bassins versants du domaine cristallin, exclut tous les bassins de la façade atlantique.

- Méthodes de prédétermination de l'écoulement annuel

Le module annuel n'est pas une caractéristique très significative étant donné sa grande variabilité interannuelle dans la zone étudiée, mais sa connaissance, liée à quelques notions sur sa distribution statistique, est nécessaire pour l'étude des conditions de remplissage des réservoirs.

- La méthode RODIER (1975). L'auteur a effectué une synthèse sur les données de l'écoulement annuel des bassins versants de la zone entre les pluviosités interannuelles 300 et 800 mm. Trois paramètres ont été retenus pour la régionalisation: la surface du bassin, la pluie annuelle et le paysage correspondant au bassin, c'est à dire l'ensemble des états de surface des sols et des facteurs caractérisant la pente. Chaque paysage correspond à un bassin type. On peut interpoler les résultats entre deux bassins types s'ils comportent les mêmes composantes en proportion variables.

- La méthode DUBREUIL ET VUILLAUME (1975). A partir d'une zonation climatique des bassins versants de l'Afrique de l'Ouest, ces auteurs présentent des formules de type régression linéaire donnant l'écoulement moyen interannuel d'un petit bassin versant en fonction des variables suivantes : la pluie annuelle, l'évaporation sur bac, le pourcentage de cultures, le pourcentage de surface occupée par des formations perméables (grès ou sable) et un indice représentant la surface et la dégradation hydrographique du bassin.

Dans cette synthèse, nous avons appliqué la méthode de prédétermination des crues d'étude de RODIER & AUVRAY (1965) sur tous les bassins étudiés, et comparé les estimations avec les valeurs déduites de l'étude hydrologique. Nous proposons une modification de la méthode pour la prédétermination des temps caractéristiques de la crue décennale, pour l'adapter aux bassins dont les exutoires sont des bas-fonds.

Les exemples des projets pilotes Mali-Sud et Casamance illustrent comment il est possible de mettre au point des méthodes simples de prédétermination des principaux paramètres hydrologiques nécessaires à la définition des aménagements de bas-fonds. Au Mali-Sud, ces paramètres sont: la crue décennale prise comme crue d'étude et l'écoulement moyen interannuel. En Casamance, il faut y ajouter ceux relatifs à la marée.

LA PREDETERMINATION DES CRUES

La méthode de RODIER & AUVRAY

RODIER & AUVRAY ont proposé en 1965 une méthode d'estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie comprise entre 10 et 200 km² en Afrique occidentale. Cette méthode est basée sur les résultats des études hydrologiques de 60 bassins versants répartis en Afrique au sud du Sahara et à l'ouest du Congo. La démarche consiste à classer le bassin étudié dans un groupe de bassins dont les caractéristiques physiographiques sont proches et de définir par abaque les paramètres de la crue décennale.

La mise en oeuvre de cette méthode passe par 5 étapes :

- estimation de la hauteur de l'averse décennale moyenne sur le bassin,
- classification du bassin suivant ses caractéristiques,
- étude du coefficient de ruissellement,
- détermination du temps de ruissellement et du temps de montée,
- détermination de la forme de la crue décennale.

Pluies moyennes de fréquence décennale sur les bassins versants

Au nord d'une ligne oblique, qui part de la latitude 8 à 9° en Côte d'Ivoire pour arriver à la latitude 4° en République Centrafricaine, les fortes averses sont généralement constituées par des tornades, averses orageuses présentant un corps de courte durée et à forte intensité. On peut également considérer que, dans le cas le plus courant, il n'y a qu'une averse par 24 heures, de sorte que l'étude statistique des tornades se ramène à l'étude des pluies journalières. La hauteur de la précipitation journalière décennale est en rapport assez étroit avec le type de régime pluviométrique. RODIER & AUVRAY établissent un premier abaque donnant la hauteur de pluie décennale en fonction de la pluie interannuelle. Il est également possible d'estimer la pluie décennale ponctuelle à partir de la figure 94 donnée dans le paragraphe précédent. La méthode d'abattement de la pluie décennale au Sahel proposée par VUILLAUME (1974) et exposée dans le chapitre concernant l'hydrologie, permet le passage de la pluie ponctuelle à la pluie moyenne sur le bassin. Le tableau CIV compare les résultats de cette estimation aux valeurs trouvées par l'étude hydrologique. Les différences sont acceptables, seuls les bassins de Casamance présentant une différence supérieure à 10% qui s'explique par la proximité de l'océan.

Classification du bassin suivant ses caractéristiques

Les critères de classification de la méthode ont été définis dans le chapitre: "une hydrographie diversifiée sur un vieux socle pénéplané". Le tableau CV rappelle les principaux paramètres.

Tableau CIV : Estimation de la pluie décennale moyenne sur les bassins

Bassin	Station climatique de référence		Pluie journalière décennale moyenne sur le bassin en mm	
	Pluie annuelle mm	Pluie jour. décennale mm	Méthode RODIER & AUVRAY	Déterminée par l'étude
Gourga Tilli	540	93	88.35	78
Roulgou Toega	540	93	83.7	73
Améné	540	93	74.4	
Ndiba	635	96	96	97
Keur S. Diama	635	96	86.4	87
Kawara	982	114	102.6	93
Damana	982	114	96.9	
Moadougou	982	114	96.9	92
Kambo amont	1067	116	116	105
Kambo barrage	1067	116	116	100
Le Brusq	1173	118	118	154
Djiguinoum	1173	118	118	138
Djilakoun	1173	118	118	136

Tableau CV : Classification des bassins versants du projet

Bassin	Surface Km ²	Régime	Classe de relief	Classe de perméabilité
Gourga Tilli	45	Sahélien	R2+	P3
Roulgou Toega	95	Sahélien	R3-	P3
Améné	157	Sahélien	R2+	P3
Ndiba	16.2	Sahélien	R2-R3	P3
Keur S. Diama	75.6	Sahélien	R3	P3
Kawara	99.8	Tropical	R4	P4
Damana	104	Tropical	R3	P4
Moadougou	112	Tropical	R3	P4
Kambo amont	4.7	Tropical	R2-R4	P4
Kambo barrage	10	Tropical	R2-R4	P4
Le Brusq	2.56	Tropical	R2-R4	P5
Djiguinoum	16.8	Tropical	R2-R3	P5
Djilakoun	24.2	Tropical	R2-R3	P5

Paramètres caractéristiques des crues

Les coefficients de ruissellement

Des abaques, sous forme de graphiques en coordonnées semi-logarithmiques, donnent le coefficient de ruissellement en fonction du type de bassin. Le volume de la crue se calcule ensuite à partir de ce coefficient et de la pluie décennale moyenne sur le bassin. Le tableau CVI compare les coefficients de ruissellement et les volumes de la crue décennale estimés par la méthode RODIER&AUVRAY et ceux déterminés dans l'étude hydrologique. Les estimations restent convenables, les erreurs relatives ne dépassent pas 30% sauf pour les bas-fonds de Casamance où la retenue du barrage de Djilakoun perturbe l'estimation des ruissellements, même à la station de Djiguinoum sous influence de la retenue.

Tableau CVI : Coefficients de ruissellement et volumes de la crue décennale

Bassin	Méthode RODIER & AUVRAY		Déterminés dans l'étude		Erreur relative sur les volumes %
	Coef de ruissellement %	Volume ruisselé 1000 m3	Coef de ruissellement %	Volume ruisselé 1000 m3	
Gourga Tilli	19	755	20	702	+8
Roulgou Toega	12	954	16	1110	-14
Améné	10	1168			
Ndiba	22	342	22	346	-1
Keur S. Dlama	21	1372	26	1710	-20
Kawara	18	1843	15	1392	+32
Damana	18	1814			
Moadougou	18	1954	20	2061	-5
Kambo barrage	11	128	10	100	+28
Le Brusq	12	36	9	35	+2
Djiguinoum	7	139	4	93	+50
Djilakoun	5	143	7	230	-38

Les temps de base et de montée

La détermination des temps de base et des temps de montée se fait sur des abaques à partir de trois critères physiographiques : la zone climatique d'appartenance, la classe de relief et le type de sol. Le tableau CVII compare les estimations aux valeurs déterminées dans l'étude hydrologique. Cette comparaison montre une surestimation importante des temps de montée et des temps de base pour tous les bassins dont le réseau hydrographique présente des parties dendritiques bien hiérarchisées avec une tendance radiale en amont et un réseau en arête en aval. Il apparaît que la forme du réseau doit être prise en compte pour la prédétermination des temps caractéristiques de crue. En entrant, dans les abaques de RODIER & AUVRAY, la surface du bassin drainée par les parties radiales des réseaux à la place de la surface totale, les estimations sont nettement améliorées (tableau CVII) et il est possible de passer à la dernière étape de la mise en oeuvre de la méthode : estimer les débits de pointe qui intéressent, en premier lieu, la sécurité des aménagements.

Tableau CVII : Temps caractéristiques de la crue décennale

Bassin	Estimation RODIER & AUVRAY						Déterminée par l'étude hydrologique	
	Surface km ²	Temps de montée h	Temps de base h	Surface corrigée km ²	Temps de montée h	Temps de base h	Temps de montée h	Temps de base h
Gourga Tilli	45	9	30	25	5	15	2.5	9
Roulgou Toega	95	13	28	30	4	15	3	22
Améné	157	15	47	65	8	25		
Ndiba	16.2	3.5	12	3	1	4	1	3
Keur S. Diama	75.6	5.5	25	14	2.4	8	3	6
Kawara	99.8	3.3	18	99	3.3	18	3	16
Damana	104	6.2	34	104	6.2	34		
Moadougou	112	6.3	35	75	5.5	31	3	16
Kambo amont	4.7	3.3	12	4.7	3.3	12	3.5	8
Kambo barrage	10	4.7	20	10	4.7	20	7	24
Le Brusq	2.56	0.8	5	2.56	0.8	5	1.25	4
Djiguinoum	16.8	5.7	25	16.8	5.7	25	5	30
Djilakoun	24.2	7	30	24.2	7	30	10	37

La forme de la crue décennale

Le débit moyen (Q_m) de la crue s'obtient en divisant le volume ruisselé par le temps de base. Le débit de pointe (Q_{max}) est ensuite déduit par la relation $Q_{max} = K Q_m$ où K , coefficient de forme, est donné en fonction des caractéristiques géomorphologiques. Le tableau CVIII compare les débits de pointe estimés et ceux déterminés par l'étude hydrologique.

Tableau CVIII : Forme de la crue décennale

Bassin	Estimation méthode RODIER & AUVRAY				Détermination par l'étude hydrologique
	Surface km ²	Q_m m ³ /s	Coef de forme	Q_{max} m ³ /s	$Q_{max} E$ m ³ /s
Gourga Tilli	45	14	3	42	48
Roulgou Toega	95	18	3.1	56	40
Améné	157	13	3.1	40	
Ndiba	16.2	24	2.6	62	60
Keur S. Diama	75.6	48	3	144	160
Kawara	99.8	28	3	84	36
Damana	104	15	3.1	47	
Moadougou	112	18	3.1	56	59
Kambo amont	4.7	1.51	2.6	3.94	1.7
Kambo barrage	10	1.77	2.6	4.61	2.3
Le Brusq	2.56	2.01	2.6	5.24	7.2
Djiguinoum	16.8	1.54	2.6	4.01	1.9
Djilakoun	24.2	1.32	2.6	3.44	4.3

Conclusion

Pour utiliser la méthode de régionalisation des crues décennales proposée par RODIER & AUVRAY sur des bassins versants comprenant à la fois une partie du réseau bien hiérarchisé de forme radiale et une partie en bas-fond longiforme, il faut faire attention à la détermination des temps caractéristiques de la crue. Cette étude a permis d'utiliser les abaques permettant de déterminer les temps de base de la crue de projet, en remplaçant la surface du bassin par celle drainée uniquement par le réseau hiérarchisé, et en supprimant les zones endoréiques du bassin pour le calcul du volume ruisselé.

Au Sud du Mali

Les bassins étudiés dans la région de Sikasso ont été recensés (tableau CDX) et classés selon la typologie de RODIER & AUVRAY. Ils appartiennent tous au climat tropical de transition. Les paramètres de la crue d'étude déterminés à partir des observations hydrologiques ont été mis en relation avec la surface des bassins. On obtient ainsi un abaque (figure 96) permettant de prédéterminer dans cette région le temps de base, le volume ruisselé et les débits maximaux.

Tableau CDX : Bassins versants étudiés dans le Sud du Mali et le Nord de la Côte d'Ivoire

BASSIN	Pan. mm	Rivière	Surface Km ²	KC	IG	IG25	Classe de relief	Classe deperméabilité
KAMBO	110	KADO	10	1.42	2.8	1.9	R2-R4	P3-P4
LOULOUNI	110	KOBAFINI	800	1.23	9.3	37.2	R4-R5	P3
BANANKORO	110	FARAKO	68	1.25	10.6	14.8	R4	P3
FLAKOHO	130	BANDAMA	30	1.17	8.7	8.7	R3	P3
WOROSSANTIAK	130	BANDAMA	12	1.21	6.9	5.2	R3	P3-P4
NAMBONKAHA	130	BANDAMA	47.6	1.38	5.3	6.4	R3	P3-P4
ZANIENA	120	DEKOROBO	764	1.27	7.3	29.6	R5	P3-P4
BOWARA	120	KOBI	270	1.48	9.1	27.3	R3-R5	P3-P4
LOBOUALA	120	DIAN	155	1.35	12	24	R3-R5	P3-P4
KRINA	120	BARARO	251	1.15	13.4	37.1	R5	P3-P4
TENAYA	120	BARARO	39	1.1	7.4	7.4	R2-R3	P3-P4
MADINA	120	DJITIKO	103	1.19	16.7	33.4	R5	P3-P4

Pan = Pluie moyenne annuelle à un poste de référence

KC = indice de Compacité

IG = Indice globale de pente en m/km

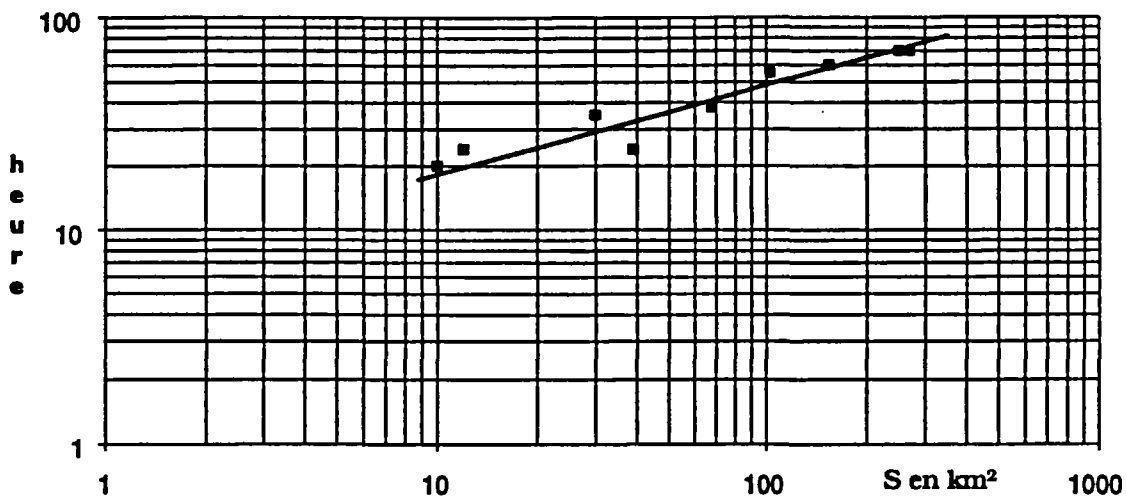
IG25 = Indice globale de pente en m/km rapporté à un bassin de 25 km

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

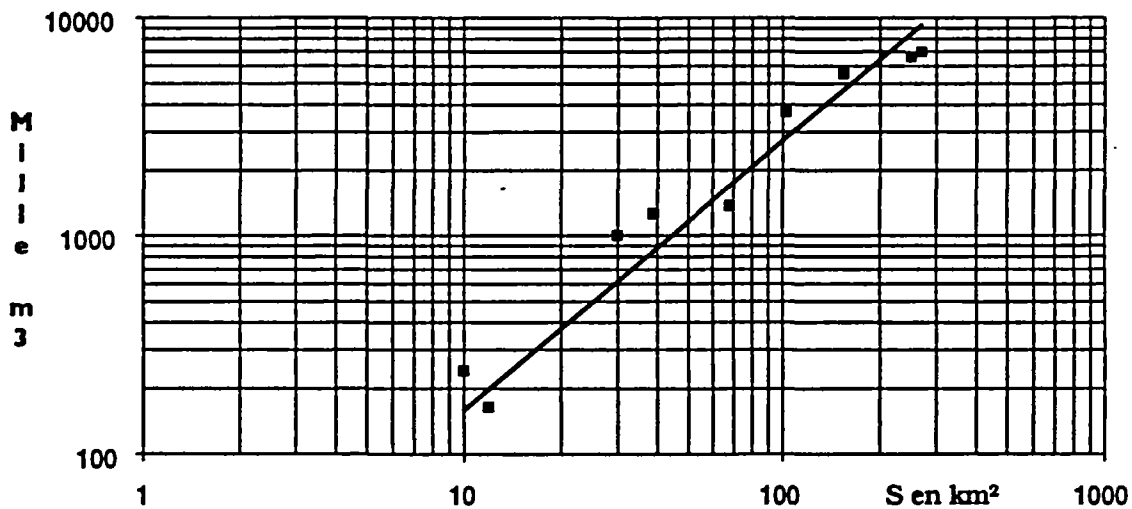
Kambo est le bassin étudié dans ce projet. Loulouni, Banakoro et Flakoho ont été étudiés une première fois par BRUNET-MORET et DUBREUIL en 1959 et ils ont été repris dans une étude plus récente de LAMAGAT (1979). Les études des bassins de Flakoho, Worossantiaka & Nambonkaha ont été publiées par DUBREUIL en 1960. Les autres bassins de la région de Sikasso ont été suivis par le service Hydrologique du Mali, dont une synthèse des observations a été publiée par LAMAGAT en 1979.

Figure 96 : Caractéristiques de la crue d'étude dans la région de Sikasso

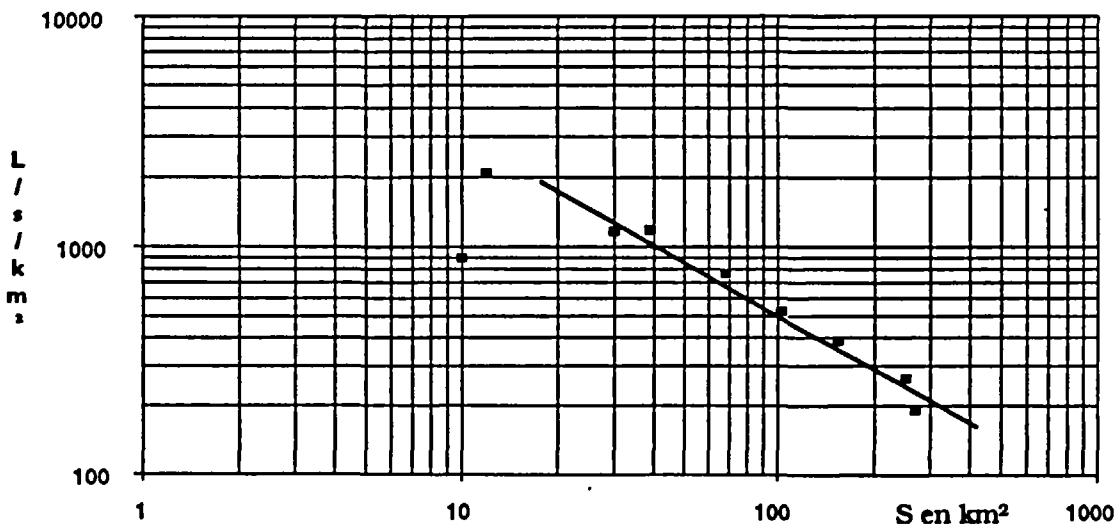
Temps de base



Volume ruisselé



Débit spécifique du maximum de crue



En Casamance

La méthode d'estimation des crues décennales de RODIER & 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), sur le bassin de Toukara par GALLAIRE (1980). Elle a été utilisée de façon satisfaisante par ALBERGEL (1987) sur 11 sites de barrages anti-sel. Pour l'ensemble des petits bassins de Casamance, les clefs d'entrée pour cette méthodes sont les suivantes :

- On choisit les abaques correspondant au climat : "régimes tropicaux et tropicaux de transition"
- Les classes de reliefs sont à choisir entre R2 et R3 en fonction des pentes des inter-fluves (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 inter-fluves 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 (158.8mm), 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 les tableaux CIV à CVIII. 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).

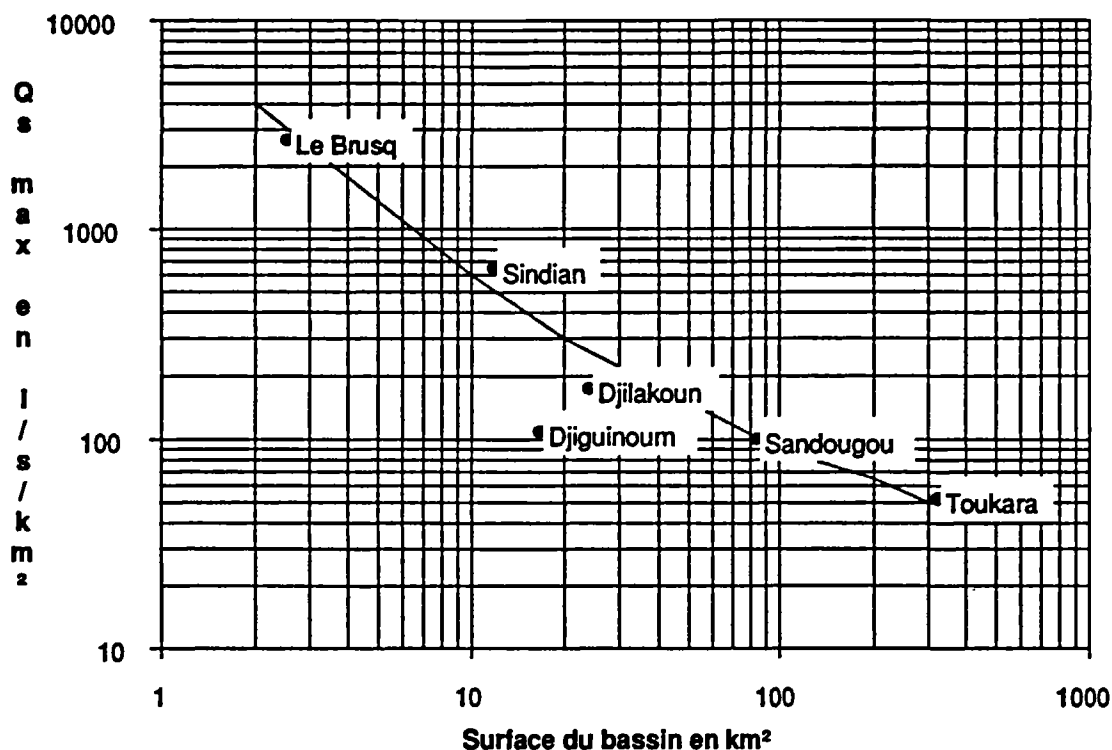
Le tableau CX donne les caractéristiques de la crue d'étude pour tous les bassins où celle-ci a pu être déterminée à partir d'observations (méthode de l'hydrogramme unitaire ou adoption d'une crue observée comme crue d'étude). A partir de ce tableau il a été possible de proposer un abaque pour l'estimation des débits spécifiques maximums pour les petits bassins de Casamance (figure 97).

Tableau CX : Crues d'étude, caractéristiques observées

Bassin	Surface Km ²	SBF Km ²	Volume m ³	T.M heure	T. base heure	Q. max m ³ /s	Q.s max l/s/Km ²	Ke %
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
Djiguitoum	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; T.M = temps de montée; Q. max et Q.s max = débits et débits spécifiques maximums.
Ke = Coefficient d'écoulement

Figure 97 : Abaque de prédétermination des débits spécifiques en Casamance



PREDETERMINATION DE LA RESSOURCE EN EAU

Au sud du Mali

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

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

$$Lr = 0.24 \times (P_{moy} - 625)$$

Lr = lame écoulée en mm

Pmoy = Pluie moyenne annuelle en mm

A partir de cette régression on obtiendrait pour Kambo une lame de 149 mm en 1988 (contre 63mm observés), de 71 mm en 1989 (contre 33 mm observés) et de 115 mm en 1990 (contre 35 mm observés).

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

A partir d'un échantillon de 52 bassins répartis entre de nombreux pays : Mali, Côte D'Ivoire, Burkina Faso, Togo, Bénin, Cameroun, Centrafrique, Madagascar et Rwanda, DUBREUIL & VUILLAUME proposent l'équation d'estimation suivante pour les bassins de savane boisée avec une pluviosité moyenne comprise entre 900 et 1800 mm :

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

- Ec: est l'écoulement annuel en mm du bassin
- Pr: représente la part disponible pour l'écoulement de l'apport pluvial, la part non disponible étant censée être représentée par l'évapotranspiration. $Pr = Pan - ETP / 3$: Pan étant la pluie annuelle en mm et ETP l'évapotranspiration potentielle en mm.
- C: est le pourcentage de sol cultivé dans le bassin. Lorsque l'information n'était pas donnée dans le rapport concernant le bassin, C a été estimé à partir des cartes au 1/200 000 de l'IGN qui s'appuient sur des photos aériennes des années 50. Ce terme permet une correction sur l'évaluation de l'évapotranspiration. Ici, un défrichage de 10 % de la superficie du bassin (suppression d'un couvert végétal dense pour le remplacer par des cultures temporaires peu couvrantes) augmente l'écoulement de 15 mm.
- Ds: est la dénivelée spécifique, produit de l'indice global de pente (m/km^2) par la racine carrée de la surface. Elle s'exprime en m.
- a et b sont des constantes d'ajustement
- A: est un terme correctif qui tient compte de la surface du bassin et de son aptitude à l'écoulement. Dans cette note, les auteurs donnent les valeurs suivantes : A = -75 mm pour les bassins dont la surface drainée est supérieure à 25 km^2 , A = 50 mm si la surface drainée est comprise entre 5 et 25 km^2 . Par essais successifs, nous avons cherché à caler au mieux ce terme et nous avons obtenu A = -75 mm pour les bassins dont la surface drainée est comprise entre 10 et 100 km^2 et A = -175 mm pour les plus grands.

Cette étude portait sur les bassins versants de 10 à 100 km^2 , mais de l'avis des auteurs, elle peut être étendue à l'intervalle 1 à 1000 km^2 . Le tableau CXI consigne les valeurs estimées par cette méthode pour les bassins choisis et compare ces estimations à celles qui sont obtenues à partir des observations (nous avons conservé celles des auteurs des études, régression linéaire entre pluie et lame écoulée à l'échelle annuelle, modèle de simulation à l'échelle journalière, ajustement statistique sur les lames écoulées ...).

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

Tableau CXI : Régionalisation du paramètre écoulement moyen annuel

	Pluvio mm	Super- ficie km ²	IG m/km	C %	Pr mm	Ds m	A mm	Ec mm	Ec obser mm
Kambo	1100	10	2.8	66	483.3	8.9	-75.0	87	84
Loulouni	1100	800	9.3	5	483.3	263.0	-175.0	200	112
Banakoro	1100	68	10.6	30	483.3	87.4	-75.0	127	114
Flakoho	1300	30	8.7	20	683.3	47.7	-75.0	158	129
Worossantiakaka	1300	12	6.9	11	683.3	23.9	-75.0	116	129
Nambonkaha	1300	47.6	5.3	6	683.3	36.6	-75.0	130	
Zaniena	1200	764	7.3	10	583.3	201.8	-175.0	181	159
Bowwara	1200	270	9.1	10	583.3	149.5	-175.0	119	138
Lobouala	1200	155	12.0	10	583.3	149.4	-175.0	118	138
Krina	1200	251	13.4	10	583.3	212.3	-175.0	194	97
Tenaya	1200	39	7.4	30	583.3	46.2	-75.0	125	129
Madina	1200	103	16.7	10	583.3	169.5	-175.0	143	142

IG = Indice global de pente, C = % de surface cultivée, Pr = Fraction pluviométrique utile à l'écoulement, Ds = Dénivelée spécifique, A = Aptitude du bassin à l'écoulement, Ec = lame écoulée calculée par la méthode DUBREUIL & VUILLAUME, Ec obser = lame écoulée estimée pour la pluviométrie de référence à partir des observations de débits

En Casamance

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 poussés à proposer des méthodes simples pour l'estimation des paramètres hydrologiques nécessaires à la conception de ces ouvrages (ALBERGEL, 1987 & 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:

- Surface des zones contributives au ruissellement. L'hydrologue doit commencer par délimiter le bassin versant contrôlé par l'aménagement projeté et réaliser une cartographie des zones basses à fort coefficient de ruissellement.
- Ressource pluviométrique. Des statistiques des pluies à l'échelle annuelle et à l'échelle journalière sur un poste de longue durée proche du site à aménager donnent 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.

Les études de bilan hydrologique, réalisées avant les observations de Djiguinoum, ont toutes eu pour objet des bassins versants continentaux. Toutes les tentatives de bilan hydrologique sur des petits bassins non barrés et influencés par la marée ont échoué, la précision des mesures de débits étant insuffisante pour déceler l'écoulement propre du bassin au cours d'un cycle de marée (études des bassins versants de Bignona par CHOURET et OLIVRY en 1981, de Baïla par GALLAIRE en 1981, de Koubalan par LAMAGAT & al (non publié)). Les études de régionalisation des paramètres de la ressource en eau ont donc été faites à partir des bassins continentaux et appliquées aux bassins maritimes en faisant les hypothèses suivantes :

- Dans le cas d'aménagement anti-sel, il n'y a plus influence de la marée et on en revient à un bassin continental.
- Les coefficients d'écoulement annuels sont équivalents dans les bassins continentaux et maritimes.
- La crue d'étude est calculée comme pour un bassin continental

Pour l'étude des amplitudes de marée, l'important réseau de marégraphes installé dans les années 60 par BRUNET MORET, et complété à l'occasion des études des marigots de Bignona et de Baïla, permet une détermination fiable de ces amplitudes en tout point de la Casamance et de ses affluents.

Les nombreuses mesures hydrogéologiques réalisées en Casamance dont une synthèse est en cours (thèse de doctorat de MALOU) confirment que le fonctionnement de la nappe observée à Djiguinoum est régional et s'applique à toutes les petites vallées étudiées.

Dans cette étude de régionalisation des paramètres hydrologiques, nous avons essayé de comparer les observations hydrologiques faites sur petits bassins versants en basse Casamance. Le tableau CXII donne la liste des bassins versants où le bilan hydrologique a été observé. De cette comparaison, il a été possible de proposer des méthodes simples de prédétermination des apports annuels, du débit maximal de la crue d'étude, des amplitudes extrêmes des marées et un schéma de fonctionnement des nappes de bas-fond qui permet de délimiter les zones où la riziculture en eau douce est possible.

Tableau CXII : Liste des bassins versants utilisés dans l'étude de régionalisation

Nom du bassin		Surface km ²	Période observée	Références
Djïnanoye	C	11	1966-67	BRUNET MORET (1970)
Tankoron	C	43	1966-67&70-71	BRUNET MORET (1970), OLIVRY & CHOURET (1981)
Django	C	135	1966-67&70-71	BRUNET MORET (1970) OLIVRY & CHOURET (1981)
Sindian	C	11.9	1970-71	OLIVRY & CHOURET (1981)
Sandougou	C	85.7	1970-71	OLIVRY & CHOURET (1981)
Toukara	C	324	1979-88	GALLAIRE (1980) OLIVRY & DACOSTA (1984), SAOS & al (1987)
Le Brusq	C	2.56	1989-90	MARIEU & al (1991)
Djiguinoum	M	16.8	1988-90	ALBERGEL & al (1990)
Djilakoun	M	25.2	1988-90	ALBERGEL & al (1990)

C = Bassin continental, M = Bassin maritime

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 1000 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 bas-fonds, ALBERGEL (1987) applique à 11 sites faisant l'objet d'une étude de faisabilité d'un ouvrage anti-sel, la formule suivante :

- Le (décennale sèche) = $(0.002 \times Ps \times (Sb - Szi)/Sb) + (0.8 \times Ps \times Szi/Sb)$
- Le (médiane) = $(0.06 \times Pm \times (Sb - Szi)/Sb) + (0.8 \times Pm \times Szi/Sb)$
- Le (décennale humide) = $(0.1 \times Ph \times (Sb - Szi)/Sb) + (0.8 \times Ph \times Szi/Sb)$

Ps, Pm et Ph sont respectivement les pluviométries annuelles de fréquence 0.1, 0.5, et 0.9 (mm)

Sb est la surface du bassin (km²)

Szi est la surface inondable (km²)

L'application de cette méthode aux bassins versants de Djiguinoum et de Djilakoun donne les résultats suivants :

	Pluie	Djiguinoum	Djilakoun
- 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, 1145 mm de pluie) et de 1990 (année de fréquence 0.1, pluviométrie 1000 mm) sur nos bassins.

	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 année plus humide devraient permettre une vérification de la méthode.

REGIONALISATION DES PARAMETRES DE MAREE

Lors de la conception des ouvrages anti-sel, il est nécessaire de déterminer les niveaux d'eau dus aux marées d'amplitudes extrêmes. 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:

$$v = \sqrt{g(H + h)} - u$$

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 sont observés dans le bassin élargi à l'aval.

La marée a été suivie durant les deux années 1989 et 1990 à l'aval du barrage 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 6h30 et celle de la marée descendante est de 5h55. 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 & OLIVRY ont observé le même phénomène sur le marigot de Baïla 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 Diogué au bord de l'océan et la station de Djilakoun est de 4h10, ce qui correspond à une vitesse de propagation de l'onde de marée de 19.5 km/h (1600 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).

A 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 la figure 98.

Figure 98 : Abaque de prédétermination des amplitudes de marée en Casamance

