

Une hydrographie diversifiée sur un vieux socle pénéplané

Les bas-fonds sont alimentés en eaux superficielles par les ruissellements et les écoulements souterrains qui proviennent des bassins versants situés topographiquement en amont. Il est donc essentiel d'associer à toute étude hydrologique les descriptions des bassins versants permettant de comprendre la relation qui existe entre le fonctionnement hydrologique des bas-fonds et leur environnement, ceci du point de vue topographique, morphométrique, physiographique et hydrographique (ALBERGEL, 1988 - ALBERGEL & CLAUDE, 1988).

LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS

Les superficies des bassins versants sont celles qui correspondent aux lignes de crête ou aux lignes de partage des eaux qui délimitent la direction des écoulements superficiels entre bassins versants. Elles peuvent différer sensiblement des surfaces fonctionnelles, c'est à dire des surfaces qui participent effectivement au ruissellement. Ainsi, sur les bassins versants de Gourga et de Roulgou Toega dans le Yatenga, de Ndiba et Keur Samba Diama dans le Siné-Saloum, des parties non négligeables des bassins versants sont endoréiques ou semi-endoréiques. Pour ces cas particuliers, il faudrait envisager des corrections de superficie ou développer la notion de bassin versant à "géométrie variable". Nous nous sommes contentés ici de conserver les bassins versants dans leur intégralité physique.

L'indice de compacité est l'indice de Gravelius, communément utilisé par les hydrologues pour caractériser la forme plus ou moins compacte ou allongée du bassin versant. Il est calculé par la formule :

$$I_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi s}} \quad \text{où } P \text{ est le périmètre du bassin en km et } s \text{ la surface du bassin en km}^2$$

Pour un cercle $I_c = 1$; pour un carré $I_c = 1.13$; pour un rectangle deux fois plus long que large $I_c = 1.20$; pour un rectangle trois fois plus long que large $I_c = 1.30$.

La longueur du rectangle (L) équivalent correspond à l'une des racines de l'équation :

$$x^2 - \frac{P}{2}x + s = 0$$

Lorsque l'équation n'a pas de racine, le bassin est plus compact qu'un carré ($I_c < 1.13$). On suppose alors que le bassin est un carré et l'on prend L égal à \sqrt{s} afin de pouvoir calculer l'indice de pente global (I_g).

L'indice de pente global (I_g) est égal à la dénivelée globale du bassin versant divisée par la longueur du rectangle équivalent. La dénivelée globale est déterminée en effectuant la différence entre l'altitude qui laisse 5% de la superficie du bassin versant au-dessus d'elle et l'altitude qui laisse 5% de la superficie du bassin versant au-dessous. Compte tenu de la disparité des superficies des bassins expérimentaux, il nous est apparu nécessaire de normaliser les indices de pente globaux en utilisant la table de conversion proposée par P. DUBREUIL (1972). L'indice de pente normalisé I_{g25} est égal au produit de l'indice global de pente par un coefficient K, fonction de la superficie du bassin; K=1 pour une superficie de 25 km².

Table de conversion de Dubreuil (I_{g25} = KI_g)

S en km ²	5	10	25	50	100	250	500
Coefficient K	0.50	0.66	1.00	1.33	2.00	2.85	4.00

L'indice des pentes transversales (IT) est déterminé en prenant la moyenne des pentes transversales du bassin, mesurées sur 60% de la longueur des versants. Cet indice est utilisé pour corriger l'indice global de pente quand les pentes transversales sont nettement plus fortes que les pentes longitudinales.

L'expression de l'indice de pente prend alors la forme : $I_{gcor} = (I_{g25} + IT) / 2$

A l'aide de l'indice de pente global corrigé (I_{gcor}), il est alors possible de répertorier tous les bassins versants dans une même classification proposée par P. DUBREUIL (1972); pour les bassins versants de 25 km²:

classe de relief (RODIER & AUVRAY)	Indices de pentes corrigés
R1	I _{gcor} < 2 m/km
R2	2 < I _{gcor} < 5 m/km
R3	5 < I _{gcor} < 10 m/km
R4	10 < I _{gcor} < 20 m/km
R5	20 < I _{gcor} < 50 m/km
R6	50 < I _{gcor} < 100 m/km
R7	I _{gcor} > 100 m/km

Pour tenir compte des différences fréquentes entre l'indice de pente global normalisé et l'indice corrigé et de la position de I_{gcor} par rapport à la valeur moyenne de la classe, nous avons adopté les notations suivantes:

- R2+ : classe de relief R2 avec I_{gcor} proche de 5 (R2 fort)
- R3- : classe de relief R3 avec I_{gcor} proche de 5 (R3 faible)
- R2-R3: classe de relief R2 avec I_{g25}, classe de relief R3 avec I_{gcor}.

L'intérêt de cette classification est de permettre de situer les bassins versants du programme bas-fonds parmi les nombreux bassins versants où les données hydrologiques ont été collectées depuis une quarantaine d'années dans toute l'Afrique tropicale.

Les caractéristiques morphométriques et topographiques des bassins versants sont consignées dans le tableau XI.

Tableau XI : Caractéristiques morphométriques et topographiques des bassins versants

Bassins	s en km ²	I _c	a max	a min	L en km	Ig25 m/km	IT m/km	Igcor m/km	Classe de relief
YATENGA									
GOURGA TILLI	45.0	1.31	372	315	12.0	3.9	4.7	4.3	R2+
ROULGOU TOEGA	95.0	1.24	372	298	15.0	5.7	5.6	5.6	R3-
AMENE	157	1.30	372	294	22.0	4.3	5.0	4.7	R2+
SINE-SALOUM									
NDIBA	16.2	1.17	46	19	5.4	3.3	10.0	6.6	R2-R3
KEUR SAMBA DIAMA	75.6	1.13	46	20	13.0	2.9	7.4	5.1	R3
COMOE									
KAWARA	99.8	1.26	493	291	16.0	16.4	20.0	18.2	R4
DAMANA	104	1.18	360	280	14.0	5.2	10.0	7.6	R3
MOADOUGOU	112.0	1.24	370	310	20.0	5.0	14.0	9.5	R3
MALI SUD									
KAMBO amont	4.7	1.23	342	325	3.4	2.0	24.0	13.0	R2-R4
KAMBO barrage	10.0	1.42	342	320	6.5	1.9	24.0	13.0	R2-R4
CASAMANCE									
LE BRUSQ	2.56	1.12	23	2	1.6	4.0	12.0	11.0	R2-R4
DJIGUINOUM	16.8	1.13	25	0	4.6	4.2	12.0	8.1	R2-R3
DJILAKOUN	24.2	1.19	25	0	7.0	3.4	12.0	7.7	R2-R3

S : superficie du bassin versant en km²

a max : altitude maximale en mètres

L : longueur du rectangle équivalent

IT : pente transversale moyenne en m/km

I_c : indice de compacité

a min : altitude minimale en mètres

Ig25 : indice global de pente normalisée en m/km

Igcor : (Ig25 + IT)/2 indice de pente corrigé en m/km.

Les bas-fonds étudiés drainent des bassins versants dont les superficies sont comprises entre 2.5 km² pour le bassin de la vallée Le Brusq en Casamance et 157 km² pour le bassin versant du barrage d'Améné au Yatenga. Certains projets ont choisi une gamme de bassins versants emboîtés, d'autres comme les projets Comoé et Siné-Saloum ont choisi de sélectionner des bas-fonds drainant des bassins versants de même superficie ou de superficies différentes.

Le bassin versant de Djiguinoum en Casamance est le plus compact. Sa forme se rapproche le plus de celle du carré. Les bassins versants de Djilakoun en Casamance, de Moadougou dans la Comoé, de Keur Samba Diama dans le Siné-Saloum et de Roulgou Toega dans le Yatenga ont la forme d'un rectangle 2 fois plus long que large. Les bassins versants de Gourga et Améné dans le Yatenga, de Kawara dans la Comoé ont une forme qui se rapproche d'un rectangle 3 fois plus long que large et le bassin versant de Kambo au droit du barrage possède un bassin versant très allongé dont la longueur dépasse 4 fois la largeur.

Les altitudes extrêmes des bassins versants restent comprises entre 280 et 372 mètres pour les bassins versants du Yatenga, de la Comoé et du Mali sud, si l'on excepte le bassin de Kawara. Les bassins versants de la Casamance ont des altitudes comprises entre 0 et 25 mètres, ceux du Siné-Saloum entre 19 et 46 mètres.

Par sa position à cheval sur des formations gréseuses du précambrien supérieur, qui constituent un plateau dont l'altitude moyenne est de 520 m au nord de la Comoé, le bassin versant de Kawara possède un relief nettement plus accusé que les autres bassins versants (classe R4).

La plupart des autres bassins versants appartiennent à la classe R2 mais possèdent des pentes transversales qui les situent dans la classe R3 ou même R4 pour les plus petits comme les bassins de Kambo et Le Brusq. Les bassins versants du projet Comoé présentent un relief légèrement plus accentué: classe R3 pour le bassin de Damana, classe R3-R4 pour celui de Moadougou.

LES RESEAUX HYDROGRAPHIQUES

L'aspect du réseau hydrographique, sa hiérarchisation et la position des confluences influent très fortement sur la formation des crues. La forme du lit majeur, sa largeur, sa pente et sa capacité de stockage influent sur leur propagation. La caractérisation du réseau hydrographique a donc pour objectif de préciser les conditions de formation des fortes crues et de faciliter la comparaison des paramètres hydrologiques conditionnant leur forme, c'est à dire le temps de base qui correspond à la durée du ruissellement pur et le coefficient de pointe, rapport du débit maximum au débit moyen. Chaque bassin versant ayant ses propres caractéristiques hydrographiques, nous avons choisi de les décrire individuellement.

Bas-fond de Bidi, projet Yatenga :

Le réseau hydrographique (figure 22, p.77) présente ici une orientation tectonique. Dans sa partie amont, sur le bassin versant de Gourga, le réseau hydrographique est radial avec la confluence de 3 affluents d'inégale importance. Dans sa partie médiane, de Gourga à Roulgou Toega, le réseau hydrographique est en arête en rive droite, semi-endoréique en rive gauche. Dans sa partie aval, en amont du barrage d'Améné, le réseau redevient partiellement radial avec la confluence au même point de 2 affluents importants. Le lit majeur du marigot est large de 50 à 100 mètres, sans lit mineur en amont avec une pente longitudinale de 9 m/km. Il s'élargit jusqu'à atteindre 200 à 300 mètres en aval, mais se rétrécit brutalement au passage d'affleurements cuirassés. Le lit mineur, bien marqué dans la partie médiane et aval, se transforme localement en mares qui se maintiennent en eau pendant toute la saison des pluies. Sa pente longitudinale est de 2 m/km dans la partie médiane, 0.7 m/km après Roulgou Toega (LAMACHERE & al, 1991).

Bas-fonds du Siné-Saloum :

Le bassin versant de Ndiba présente un réseau hydrographique dendritique bien hiérarchisé en amont avec une tendance radiale et disposé en arête dans sa partie aval. Le lit du marigot est plat, faiblement concave dans la partie amont, très marqué avec des lits majeur et mineur très encaissés dans leur partie aval où la pente longitudinale est de 3 m/km (ALBERGEL & al, 1991).

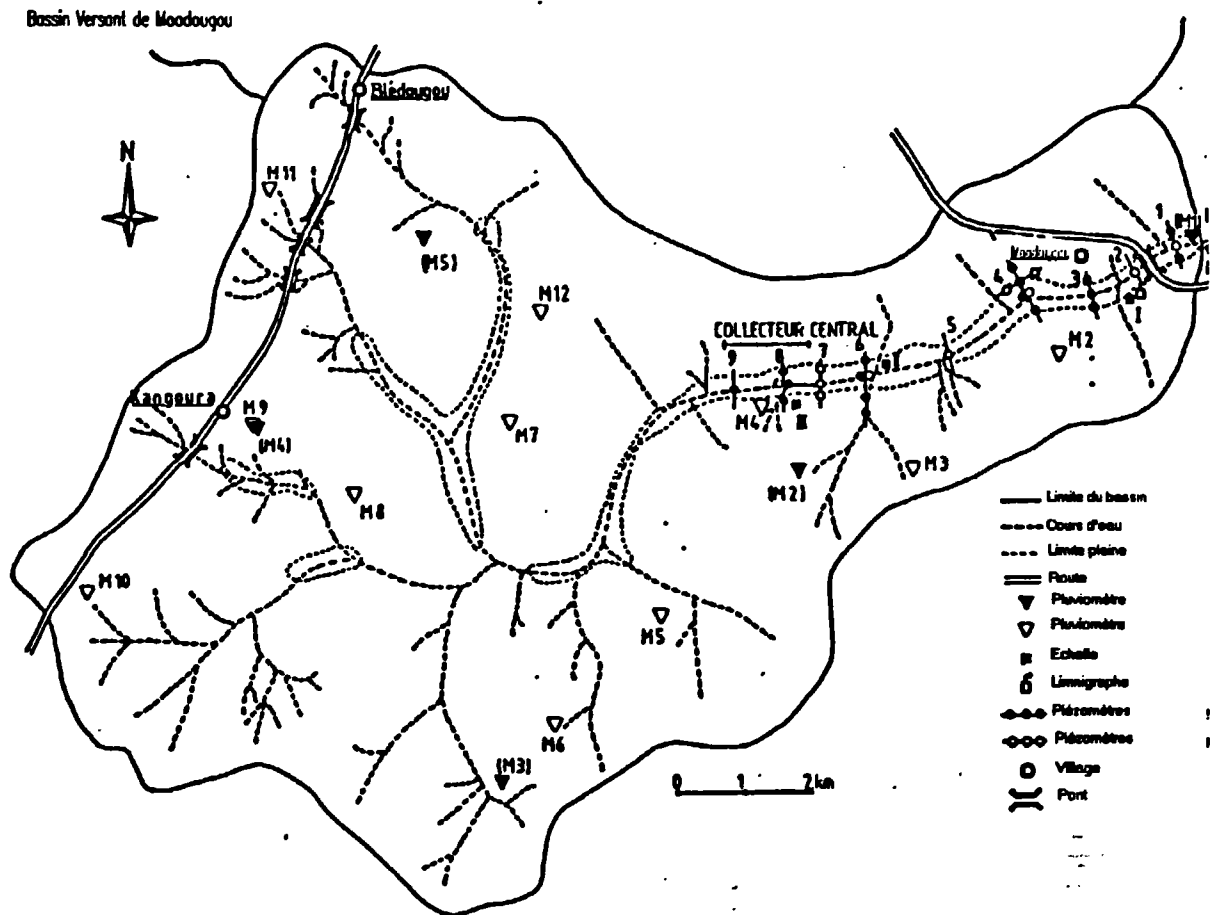
Le réseau hydrographique du bassin versant de Keur Samba Diama est disposé en arête avec des affluents plus importants en rive gauche et une tendance radiale dans sa partie aval. Le lit du marigot présente à peu près les mêmes caractéristiques que celui de Ndiba avec une largeur plus importante et des chapelets de mares dans sa partie aval où la pente varie entre 1.3 et 4 m/km.

Bas-fonds de la Comoé :

Le bassin versant de Damana possède un réseau hydrographique dendritique bien hiérarchisé sans lit mineur avec un lit majeur à fond plat bien encaissé d'une largeur de 200 mètres en amont, 400 mètres à l'aval. Le réseau hydrographique du bassin versant de Kawara est radial en amont avec 2 points de confluence distincts et disposé en arête en aval, sur une courte distance (3 km). Le lit majeur est à fond plat d'une largeur de 100 à 300 mètres sans lit mineur avec une pente longitudinale de l'ordre de 2 m/km.

Le réseau hydrographique du bassin versant de Moadougou est radial en amont avec une tête de bassin hypertrophiée et un tronçon aval en arête sur une longueur de 10 kilomètres. Le lit majeur est étroit, large de 100 à 200 mètres, avec un lit mineur bien marqué rendu rectiligne par l'aménagement de sa partie aval. La pente longitudinale du bas-fond est de l'ordre de 1.2 m/km. La figure 12 montre le réseau hydrographique du bassin de Moadougou (CIEH, 1992).

Figure 12 : Réseau hydrographique du bassin de Moadougou



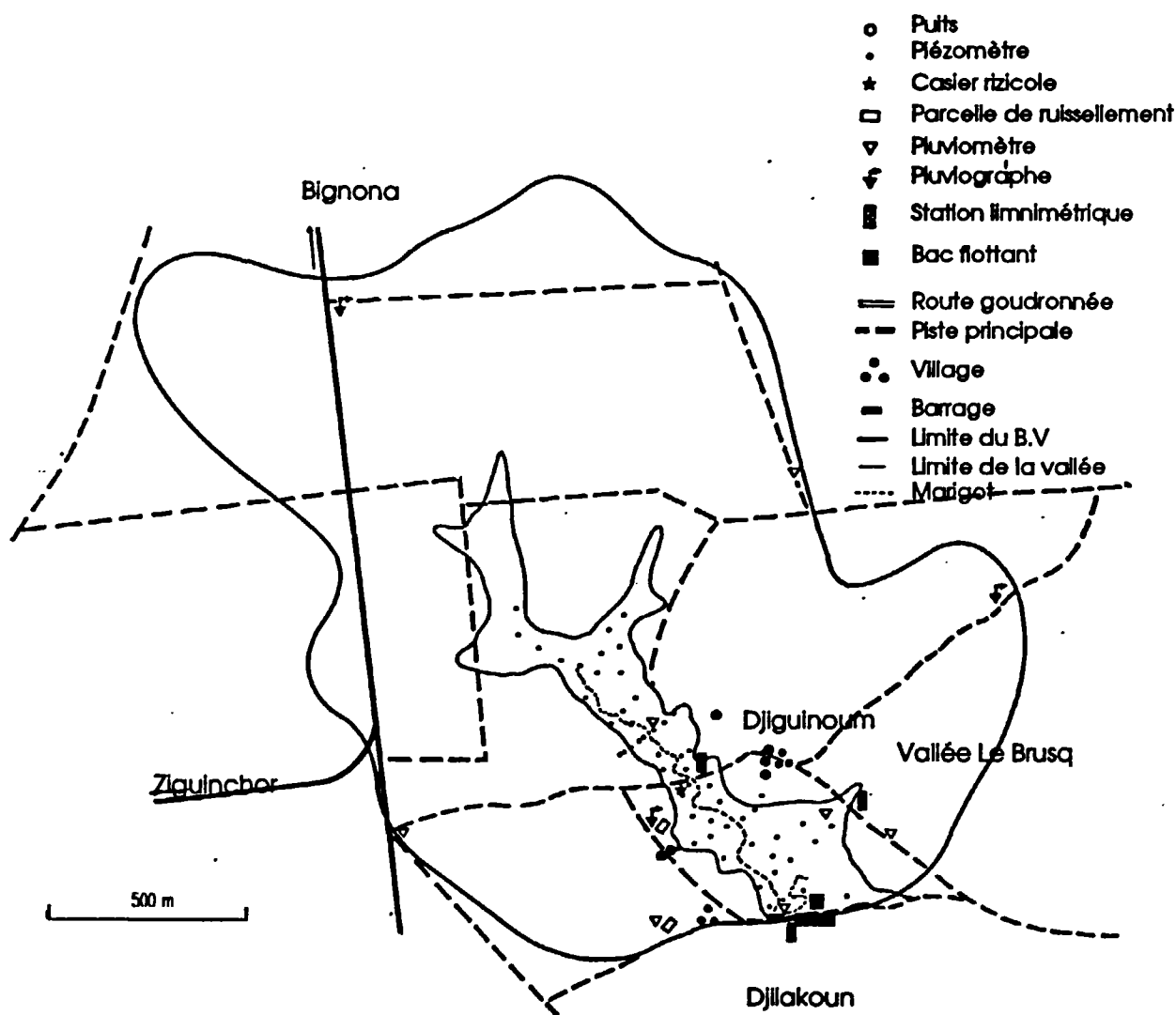
Bas-fond de Kambo, projet Mali sud :

Le petit bassin versant de Kambo est très allongé; son réseau hydrographique est disposé en arête; le lit majeur y est plat, large d'une centaine de mètres, sans lit mineur avec une pente moyenne de 2.5 m/km (GUIGUEN, 1991).

Bas-fond de Djilakoun, projet Casamance:

Le bassin versant de Djilakoun est marqué par l'absence d'un réseau hydrographique constitué, lequel reste tronqué au bas-fond qui se subdivise en petits rameaux spatulés. Le lit mineur du bas-fond est bien marqué sous l'influence des flux et reflux de la marée dans sa partie aval. La figure 13 montre le réseau hydrographique du bassin de Djilakoun (ALBERGEL & al 1991).

Figure 13 : Réseau hydrographique du bassin de Djilakoun.



LES CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES

La description physiographique détaillée des bassins versants permet de déterminer leur aptitude au ruissellement et de définir différentes aires contributives de l'écoulement. Les sites expérimentaux du Yatenga et du Siné-Saloum ont bénéficié d'une description physiographique complète de leur bassins versants selon la méthode de caractérisation des états de surface proposée par A. CASENAVE ET C. VALENTIN (1989). Les autres sites expérimentaux n'ont fait l'objet que de descriptions partielles sous la forme de cartes pédologiques, de cartes des formations végétales et de l'occupation des sols. Pour homogénéiser la présentation des résultats, six unités de paysage ont été retenues pour chacun des bassins versants étudiés:

- 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.

Un coefficient de ruissellement moyen a été attribué aux sols de chacune des unités de paysage. Ce coefficient de ruissellement correspond à la part de la lame d'eau ruisselée d'une averse de récurrence décennale. Les lames ruisselées ont été établies à partir d'une cartographie des unités paysagiques et du référentiel du catalogue des états de surface (CASENAVE & VALENTIN, 1988) ou des résultats acquis sur les sites de simulation de pluie pour les projets Yatenga, Siné-Saloum et Casamance.

CARTOGRAPHIE DES UNITES PAYSAGIQUES

Sur les bassins versants de la Comoé et du Mali-Sud, l'analyse des images satellitaires réalisée par A.I. MOKADEM ET A. NONGUIERMA (1992) permet de procéder à une classification des paysages en zones humides, zones de cultures et de végétation naturelle sur les versants (Planche couleur 4). La zone des cultures sur versants regroupe l'habitat, les jachères et les cultures. La zone de végétation naturelle sur les versants a été subdivisée, dans la classification numérique de l'image, en 4 classes de recouvrement végétal:

- une classe de végétation très dense au taux de recouvrement supérieur à 70%,
- une classe de végétation dense au taux de recouvrement compris entre 40 et 70%,
- une classe de végétation moyennement dense au taux de recouvrement compris entre 20 et 40%,
- une classe de végétation peu dense au taux de recouvrement inférieur à 20%.

Il est ainsi possible, grâce à l'imagerie satellitaire, d'effectuer une analyse assez fine du taux de recouvrement de la végétation naturelle.

Comme le présentent MOKADEM et al (1991), la notion de zones humides englobe des éléments qui ne peuvent pas être classés dans le concept strict de bas-fond tel que le définit M. RAUNET (1985). Ce sont notamment :

- les plans d'eau et mares,
- les terres humides engorgées qui se localisent dans:
 - * les vallons,
 - * les plaines alluviales à drainage déficient, mais aussi:
 - * sur les plateaux à surface horizontale localement déprimée,
 - * en amont des formations éoliennes allochtones qui perturbent le tracé du réseau hydrographique et le ruissellement.

Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, les plateaux cuirassés, appelés "bowés" au Burkina Faso (singulier bowal), sont parsemés de petites dépressions endoréiques qui forment des mares en saison des pluies. Ces dépressions sont souvent entourées d'une abondante végétation ligneuse. Au Yatenga, les formations sableuses éoliennes, par leur accumulation locale sous la forme de micro-dunes, arrivent à perturber l'écoulement naturel des petits marigots des versants faiblement inclinés tel que le versant situé en rive gauche du bas-fond de Bidi. Sur l'ensemble des cinq sites expérimentaux, les bas-fonds constituent cependant la majeure partie des zones humides.

APTITUDE AU RUISSELLEMENT DES UNITES PAYSAGIQUES

Dans le Yatenga, comme dans la zone sahélienne et soudano-sahélienne, les sols nus encroûtés ont des aptitudes au ruissellement extrêmement fortes (des coefficients de ruissellement supérieurs à 75%). Ils se localisent fréquemment de chaque côté des bas-fonds, formant les chanfreins dénudés sur les versants de raccordement aux glacis ou aux pseudo-glacis. Ils occupent environ 30% de la superficie des bassins versants. Leur importance est faible dans le Siné-Saloum, nulle sur les autres bassins versants.

Sur les sols cultivés, le calendrier cultural et les techniques culturales jouent un rôle fondamental sur l'aptitude des sols au ruissellement. Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, les cultures sur versants sont pratiquées sur des sols sableux fins qui subissent en général 2 sarclages pour le mil et 3 pour l'arachide au cours de la saison des pluies. J.M. LAMACHERE (1991) a montré que le sarclage et le labour font chuter de manière considérable les coefficients de ruissellement, qui descendent à des valeurs de l'ordre de 20 à 25% pour les fortes pluies après sarclage, mais que sous l'impact des gouttes de pluies, la surface du sol sarclé se transforme rapidement. Après 100 mm de pluie suivant un sarclage, le coefficient de ruissellement atteint 40 à 50% pour une forte pluie et peut culminer à des valeurs de l'ordre de 70 à 80% après 200 mm de pluie sans travail du sol. Un sol cultivé peut donc se comporter comme un sol nu encroûté s'il n'est pas retravaillé après de fortes pluies. Le développement des plantes cultivées et des adventices modère l'augmentation des coefficients de ruissellement mais il existe encore peu d'informations chiffrées sur leur effet réel. Les expérimentations en cours dans le Siné-Saloum par P. PEREZ et al (1992) devraient apporter d'intéressantes informations sur le rôle du couvert arachidier.

Dans la province de la Comoé et le sud du Mali, les sols des versants cultivés sont en général sablo-gravillonnaires sur la partie haute des versants, sableux grossiers à mi-versant et sablo-limoneux sur les bas-versants. Ils sont travaillés en billons isohypses non cloisonnés. On dispose cependant de peu d'informations sur l'évolution de leur aptitude au ruissellement et à l'infiltration. Sur les sols sableux grossiers de la région de Manga au Burkina Faso, J. ALBERGEL (1987) donne des valeurs de coefficients de ruissellement de l'ordre de 10 à 20% pour les pluies moyennes, de 40% pour les pluies extrêmes (fréquence décennale).

Les surfaces naturelles bien couvertes par une végétation herbacée ou ligneuse dense sont peu aptes au ruissellement. Les jachères récentes et les zones à végétation ligneuse dense appartiennent à cette catégorie de surfaces pour laquelle le coefficient de ruissellement, pour des pluies extrêmes, est inférieur à 20%. Les coefficients de ruissellement varient en fonction des taux de recouvrement du tapis herbacé. Pour des pluviométries annuelles inférieures à 600 mm, le tapis herbacé devient discontinu et les coefficients de ruissellement présentent une forte variabilité spatiale.

La dernière ligne du tableau XII fournit des ordres de grandeur des coefficients de ruissellement de chaque unité paysagique pour les pluies journalières de fréquence décennale.

Tableau XII : Les unités paysagiques des bassins versants

	Zones humides bas-fond%	culture sur versant%	jachères %	dense %	végétation claire %	sol nu %
YATENGA						
Gourga Tilli	7	14	6	39	5	29
Roulgou Toéga	7	12	8	30	14	29
Améné	9	12	11	23	15	30
SINE-SALOUM						
Ndiba	3	52	10	10	23	2
Keur Samba D.	6	43	12	5	23	11
COMOE						
Kawara	9	25	15	51		0
Damana	11	15	8	66		0
Moadougou	7	15	7	71		0
MALI SUD						
Kambo	6	34		60		0
CASAMANCE						
Djilakoun	6	15	10	32	37	0
Estimation du Coefficient de Ruissellement décennal	0.8	0.2 à 0.8	0.2	0.2 à *0.1	0.5 à *0.1	0.8

Nb: *0.1 : valeurs adoptées en Casamance (ALBERGEL & al 1991).

Une incertitude importante subsiste sur les valeurs du coefficient de ruissellement des sols cultivés. Nous avons adopté une valeur moyenne égale à 0.4 pour toutes les surfaces cultivées sur versants.

En pondérant les coefficients de ruissellement de chaque unité paysagique par leur taux d'occupation et en effectuant la somme des valeurs résultantes pour chaque bassin, on obtient une estimation des coefficients de ruissellement des sols de fréquence décennale. Cette estimation, qui ne tient pas compte des capacités de stockage du réseau hydrographique fonctionnel, est une valeur limite du coefficient de ruissellement sur le bassin versant. Dans les régions qui présentent des zones endoréiques, on opère un abattement du coefficient de ruissellement en fonction du taux d'occupation de celles-ci sur le bassin versant. Le tableau XIII donne les surfaces de la zone endoréique, du coefficient de ruissellement et de la classe de perméabilité correspondante, suivant la classification de RODIER & AUVRAY (1965) pour les bassins versants du projet.

Cinq classes de perméabilité ont été définies par RODIER & AUVRAY (1965):

- P1: Bassins rigoureusement imperméables, entièrement rocheux ou argileux.
- P2: Bassins imperméables avec quelques zones perméables de faible étendue ou bassins homogènes presque imperméables.
- P3: Bassins assez imperméables comportant des zones perméables étendues ou bassins homogènes assez peu perméables.
- P4: Bassins assez perméables tels qu'on en rencontre en zone de décomposition du granit avec abondance d'arènes.
- P5: Bassins perméables : sables ou carapaces latéritiques très fissurées.

Tableau XIII : Coefficients de ruissellement par bassin

Bassin versant	Superficie bassin km ²	Superficie endoréique km ²	Coef. de ruiss. décennal	Classe perméabilité
Projet Yatenga				
Gourga Tili	45	4	0.42	P3
Roulgou Toega	95	17	0.39	P3
Améné	157	17	0.45	P3
Projet Siné-Saloum				
Ndiba	16.2	2.4	0.34	P3
Keur Samba Diama	75.6	11.3	0.39	P3
Projet Comoé				
Kawara	99.8	0	0.3	P4
Damana	104	0	0.3	P4
Moadougou	112	0	0.27	P4
Projet Mali sud				
Kambo barrage	10	0	0.28	P4
Projet Casamance				
Djilakoun	24.2	0	0.2	P5