

Des sols à faible potentiel agronomique

MORPHO-PEDOLOGIE

MORPHO-PEDOLOGIE LONGITUDINALE

Les sols mis en place à partir des colluvions et des alluvions dans les bas-fond se différencient de l'amont vers aval des axes de drainage selon une dynamique liée aux écoulements de surface dans les régions où la pluviométrie annuelle est inférieure à 1000 mm, selon une dynamique liées aux écoulements superficiels et souterrains dans les régions où la pluviométrie annuelle est supérieure à 1000 mm.

RAUNET (1985) différencie de façon générale les bas-fonds en trois tronçons:

La tête des bas-fonds

La tête des bas-fonds est souvent élargie en "spatule" ou en "amphithéâtre". Les sols y sont sableux, l'altération en place est proche de la surface. L'eau s'écoule librement et disparaît rapidement après les crues.

Le bassin versant a une superficie allant de quelques hectares à quelques kilomètres carrés. On n'y distingue pas encore de réseau hydrographique. Le ruissellement se fait en nappe en suivant des chemins préférentiels marqués par la différenciation des états de surface. (CASENAVE & VALENTIN, 1989).

La partie amont

Une discrète entaille discontinue apparaît au centre du profil transversal qui devient horizontal de part et d'autre de cette entaille. Les flancs sont nettement concaves. Les sols deviennent argilo-sableux et peuvent y acquérir, si le régime hydrique est assez contrasté, des caractères vertiques. Ils contiennent une part de matériaux issus des versants. On ne remarque pas d'alluvions franches, mais des apports colluvio-alluviaux occupent la zone centrale du bas-fond.

La surface du bassin est de 5 à 20 km². Le ruissellement se concentre dans le bas-fond qui est généralement perméable en début de saison des pluies. Cette perméabilité est induite par la végétation, l'activité de la mésofaune et les fentes de retrait lorsque le sol a un caractère vertique. Le bas-fond devient rapidement imperméable lorsqu'il est gorgé d'eau par la remontée du niveau des nappes aquifères.

La partie aval

Le bas-fond s'élargit, son profil transversal s'aplatit. Le lit mineur est bien marqué et encaissé. Il est bordé de diverses levées alluviales. Un véritable remblai colluvio-alluvial de texture argilo-limoneuse, souvent colmaté, parfois à caractère vertique, surmonte la couche sablo-gravillonnaire qui repose sur les altérites. Le bassin versant a une surface de quelques dizaines de km² à 200 km². La perméabilité des sols y est assez faible vu leur texture argilo-sableuse ou argilo-limoneuse. Elle varie en fonction de l'état de surface. Sur les parties non cultivées le sol est couvert d'une pellicule de décantation reposant sur une surface réorganisée comprenant une superposition de pellicules à éléments fins. La perméabilité globale mesurée sous pluie simulée et à l'état saturé est toujours inférieure à 10 mm/h (ALBERGEL, 1987). C'est dans cette partie que l'on trouve le plus fréquemment les cultures. Ces dernières induisent des organisations de surface particulières et des variations dans les paramètres hydro-dynamiques des sols.

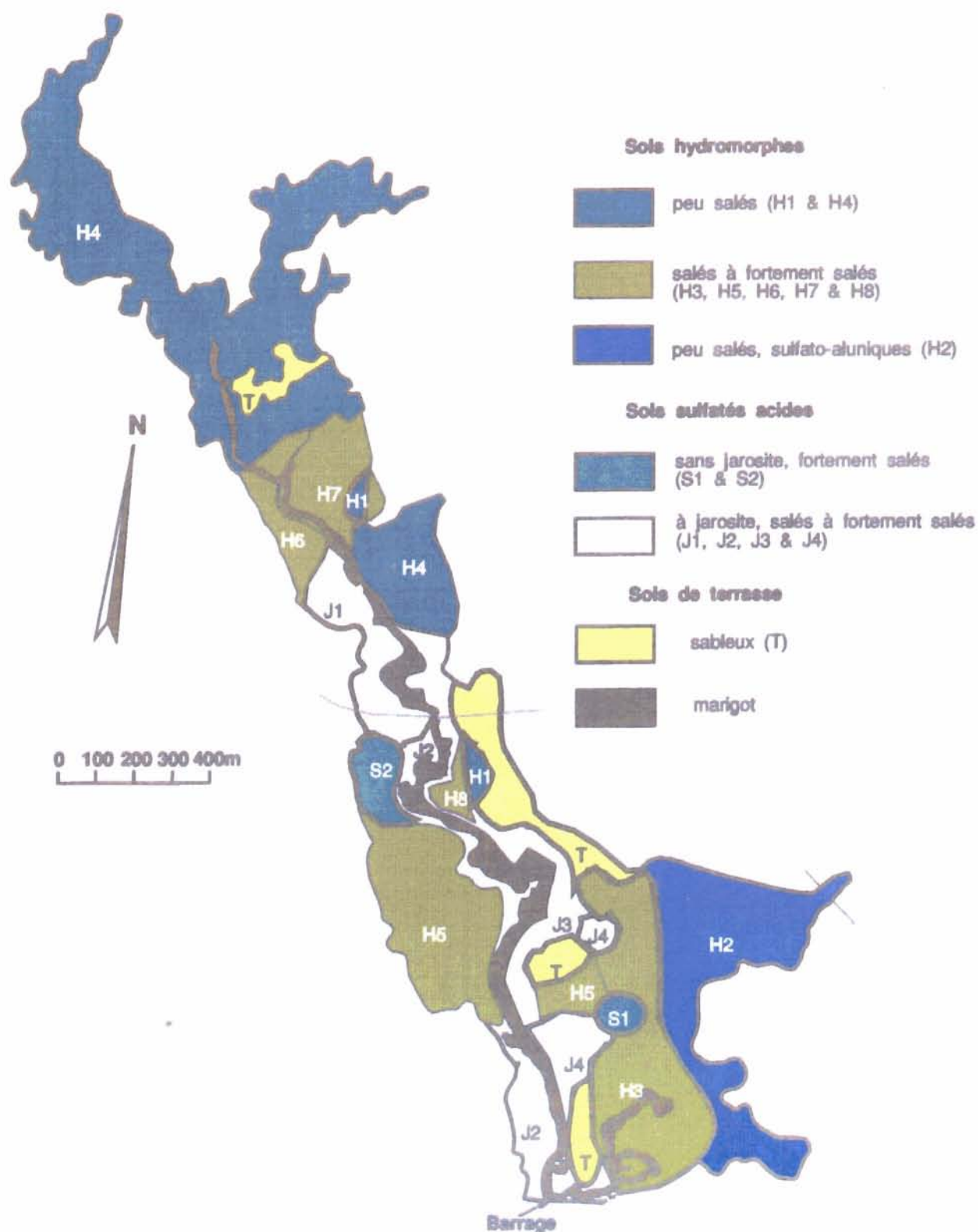
Les alluvions des bas-fonds sont des dépôts de décantation sous strate graminéenne; celle-ci permet l'étalement d'une nappe peu turbulente issue du débordement du cours d'eau enrichi des écoulements provenant des ruissellements sur les versants et des écoulements souterrains provenant de l'affleurement des nappes aquifères dans le bas-fond.

Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, les sols de la zone centrale sont de type peu évolué d'apport colluvial en tête de bas-fond, de type peu évolué d'apport colluvio-alluvial hydromorphes dans la partie amont et hydromorphe à pseudo-gley dans la partie aval. De l'amont vers l'aval, les sols des bas-fonds sahéliens et soudano-sahéliens s'enrichissent en éléments fins et présentent des caractères hydromorphes de plus en plus affirmés.

Dans le sud du Mali et dans la Comoé, les sols de la zone centrale sont de type ferrugineux tropical lessivé sur matériaux sablo-argileux et gravillonnaires en tête de bas-fond. Ces mêmes sols deviennent hydromorphes dans la partie amont puis de type hydromorphes à pseudo-gley dans la partie aval où ils peuvent cependant posséder localement une texture grossière sableuse à argilo-sableuse très hétérogène.

En Casamance, les sols de la zone centrale sont hydromorphes peu salés en tête de bas-fond et dans les parties amont ou aval hors de l'emprise des marées. Les sols deviennent salés à fortement salés à proximité du lit mineur quand son altitude est inférieure à celle de la marée haute. La carte des sols du bas-fond de Djiguinoum, présentée sur la planche couleur 2, illustre bien la disposition générale des types de sols dans les bas-fonds de Casamance sous l'influence de la marée.

Planche couleur 2 : Cartes des sols du bas-fond de Djigoum (BRUNET, 1988)

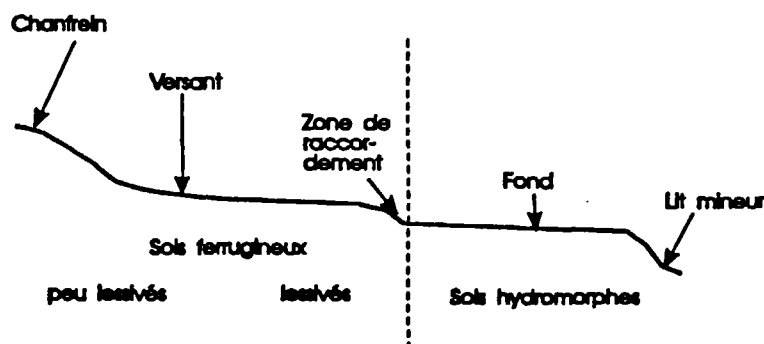


MORPHO-PEDOLOGIE TRANSVERSALE

Traits communs aux cinq projets

Les sols mis en place à partir des altérites se différencient également transversalement des axes des bas-fonds de la zone centrale vers les versants. Plus généralement, les différents sols sur l'ensemble des projets pilotes s'organisent suivant le schéma de la figure 34.

Figure 34: Différents sols suivant la morphologie



Depuis le versant jusqu'à l'axe central d'écoulement, on distingue :

Le chanfrein ou zone de raccordement

Il correspond aux pentes de raccordement entre le versant et le bas-fond au sens strict. Ces pentes sont généralement fortes, de 1 à 5 %. Dans les zones les plus sèches (projets Yatenga et Siné-Saloum), ce sont des surfaces dénudées. La végétation est généralement une savane arbustive très dégradée avec de nombreux champs de culture. Cette dégradation est due à une érosion hydro-éolienne importante facilitée souvent par les labours et le piétinement des animaux. Les sols sont de type ferrugineux tropical peu lessivé avec concrétions ou indurations (cas du Yatenga sur les parties amont et médianes des bas-fonds). Dans les zones plus humides, les sols ferrugineux tropicaux sont lessivés et présentent un faciès sableux généralisé. Les liaisons entre les particules (argile, oxy-hydroxydes de fer, matière organique) sont rompues au cours de la dessiccation extrême de la surface du sol provoquant l'appauvrissement du profil en éléments fins. Le régime hydrique des sols se modifie, favorisant la lixiviation des sols. L'intervention humaine est un facteur supplémentaire qui accélère le processus de déferrallitisation surtout lorsque les conditions climatiques deviennent de plus en plus contrastées.

Les versants du bas-fond

Les versants sont pris en compte jusqu'au changement de pente. Ils peuvent être rectilignes, concaves, convexes, successivement concaves puis convexes ou inversement. Les pentes mesurées y varient de 2 à 10%. Cette observation rejoint celle de KILLIAN & TEISSIER (1973) qui remarquent pour l'ensemble des bas-fonds soudano-sahéliens des pentes variant de 2 à 4 % et de 6 à 10 % suivant les types morphologiques. Les versants reçoivent d'une part les apports sableux, limoneux ou argileux de l'érosion hydrique du chanfrein et, d'autre part, des apports en eau et en matières fines des plus hautes crues des ravines collatérales. Ils restent filtrants et ne sont que temporairement submergés. Le couvert végétal, composé d'arbres et arbustes, est faible dans le Sahel, dense dans la zone soudanienne. C'est le domaine de prédilection pour les vergers (bananerales à Kambo au Mali-Sud, arbres de cueillette au Yatenga). On y retrouve surtout des sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés en fonction de la zone climatique.

La zone de raccordement versant/zone centrale

Elle est caractérisée par une rupture de pente plus ou moins nette, spécifique à chaque type de bas-fond. Elle est submergée par les crues d'importance moyenne à forte. La zone de raccordement correspond à des zones de dépôts, principalement colluviaux, plus abondants au débouché des émissaires latéraux qui alimentent en eaux de ruissellement l'écoulement des marigots.

Dans les régions sahéliennes et soudano-sahéliennes, les sols de cette zone sont de type peu évolué d'apport colluvio-alluvial, hydromorphes en profondeur.

Dans les régions soudanaises et guinéennes du sud du Mali, dans la Comoé et en Casamance, les sols de cette zone sont souvent sableux hydromorphes lessivés car ils correspondent aux zones d'affleurement des nappes aquifères. Les sols y sont gris de type éluvial.

La zone centrale

Elle correspond au bas-fond proprement dit. La pente longitudinale est variable et la pente transversale est inférieure à 1%. C'est une zone régulièrement inondée. L'inondation est pérenne durant l'hivernage au sud de l'isohyète 1000 mm, temporaire au Yatenga et au Siné-Saloum. C'est la zone envahie par les marées dans les zones estuariennes (Casamance). Elle comprend généralement une entaille ou drain qui correspond au lit mineur du marigot. La sédimentation des remblais argileux et la bonne production de biomasse de restitution y autorisent la culture là où l'eau ou la violence des crues ne sont pas limitants. Les cultures fréquentes y sont le riz, les cultures maraîchères et le sorgho de bas-fond dans les zones sèches.

Projet Yatenga

La figure 35, qui présente la carte pédologique et la coupe transversale du bas-fond de Bidi-Gourga au Yatenga, donne une idée de cette différenciation.

Projet Casamance

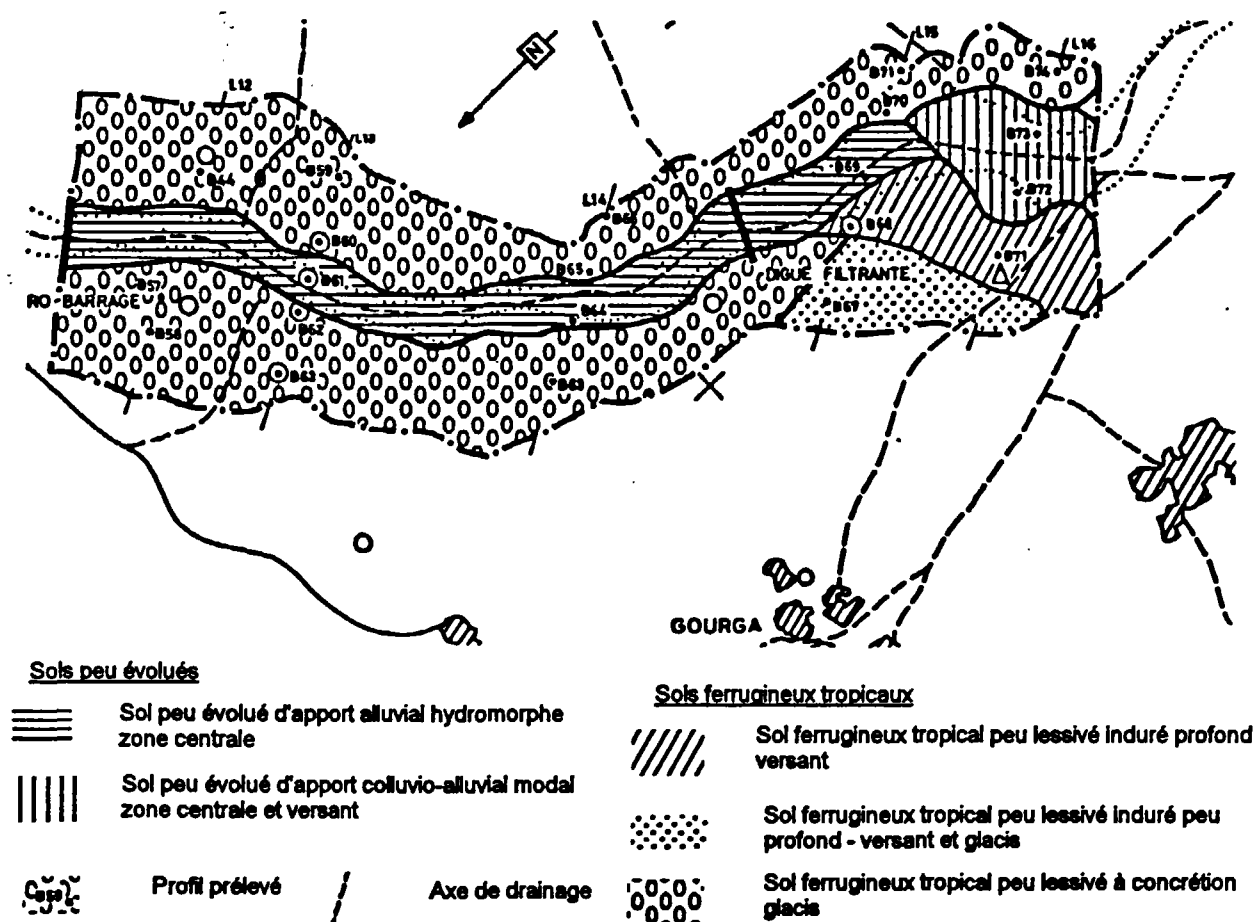
En Casamance, les sols s'organisent de la manière suivante selon la topographie (figure 36).

. Au sommet des plateaux, on trouve le domaine des sols ferrallitiques partiellement désaturés sur matériau argilo-sableux du Continental terminal (I). Ces sols sont profonds (plusieurs mètres) et se caractérisent par leur couleur rouge plus ou moins prononcée et par leur structure pseudo-particulaire. L'horizon supérieur est appauvri en argile et faiblement organique (III).

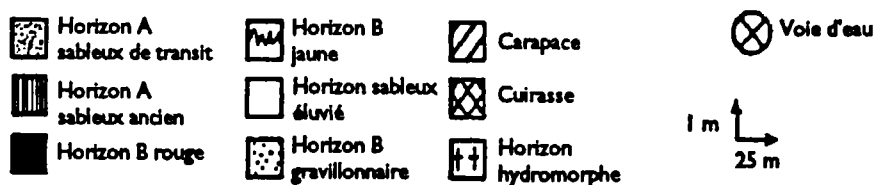
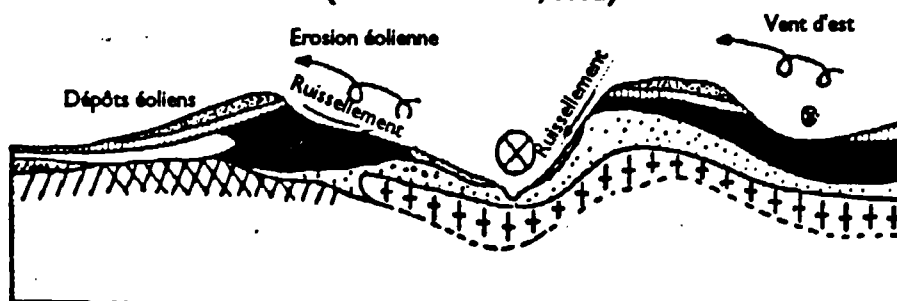
. La bordure du plateau et le versant de la vallée sont occupés par les sols ferrugineux tropicaux qui constituent un terme d'évolution des sols rouges (IV1). Leur couleur ocre ou beige est due au processus de déferrallitisation des sols rouges qui s'opère par suite de la modification de l'organisation des constituants. Les liaisons entre les particules (argile, oxy-hydroxydes de fer, matière organique) sont rompues au cours de la dessiccation extrême de la surface du sol provoquant l'appauvrissement du profil en éléments fins. Le régime hydrique du sol se modifie, favorisant les mécanismes de transformation des sols rouges en sols beiges. L'intervention humaine est un facteur supplémentaire qui accélère le processus de déferrallitisation.

. Le bas de versant est constitué par des sols hydromorphes (IV2) présentant un faciès sableux généralisé. Ils sont appelés sol gris et forment le terme ultime de la transformation précédente. Ils se prolongent dans le bas-fond par les sols sableux hydromorphes de terrasse et par les dépôts argileux et organiques du domaine des sols sulfatés acides (V).

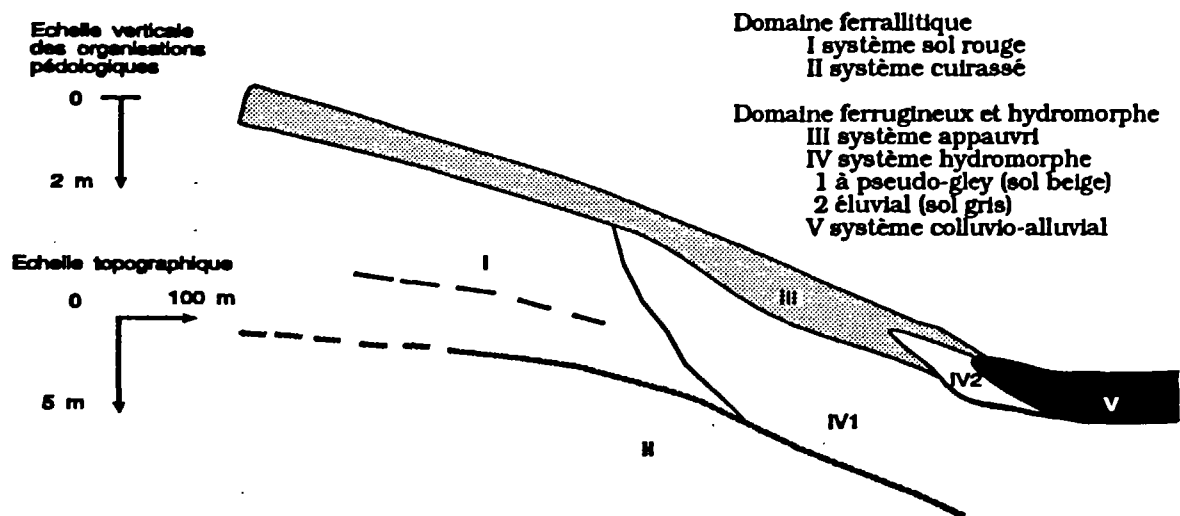
**Figure 35 : Carte et coupe pédologique du bas-fond de Bidi-Gourga
(ZOMBRE, 1991 - SERPANTIE & al, 1992)**



**Coupe pédologique transversale du bas-fond de Bidi-Gourga
(SERPANTIE & al, 1992)**



**Figure 36 : Organisation des sols suivant la topographie en Casamance
(ALBERGEL & al. 1991)**



CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

GRANULOMETRIE

Le sol apparaît comme un complexe dynamique à trois phases: une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse qui s'interpénètrent et s'influencent réciproquement.

L'étude de la composition de la phase solide du sol conduit à distinguer en première analyse, les particules minérales des particules organiques. L'analyse granulométrique, par la séparation des parcelles minérales selon leur taille, permet de caractériser la texture des sols. Elle s'effectue après une destruction préalable de la matière organique. Le tableau XXII présente les résultats des analyses granulométriques effectuées dans les bas-fonds des projets pilotes. Les fractions granulométriques analysées sont les suivantes:

- * les argiles aux particules de taille inférieure à 2 μm ,
- * les limons (ou silts), de taille inférieure à 50 μm et supérieure à 2 μm ,
- * les sables fins, de taille inférieure à 200 μm et supérieure à 50 μm ,
- * les sables grossiers, de taille inférieure à 2 mm et supérieure à 200 μm ,
- * les éléments grossiers, gravillons, graviers, cailloux, de taille supérieure à 2 mm.

L'utilisation d'un triangle des textures, tel que le diagramme des textures des USA ou le diagramme du GEPPA (1963), permet de classer chaque horizon pédologique selon ses caractéristiques granulométriques. Nous nous sommes limités à la présentation des analyses de 4 horizons pédologiques: 0 à 15cm, 15 à 30cm, 35 à 75cm et 75 à 115cm. Ces quatre horizons permettent d'observer les variations granulométriques en fonction de la profondeur en relation avec l'enracinement des cultures de bas-fond qui est de l'ordre de:

- 25 cm pour le riz inondé,
- 50 cm pour le riz pluvial,
- 100 à 150 cm pour le sorgho.

Tableau XXII: Granulométrie des sols de bas-fond

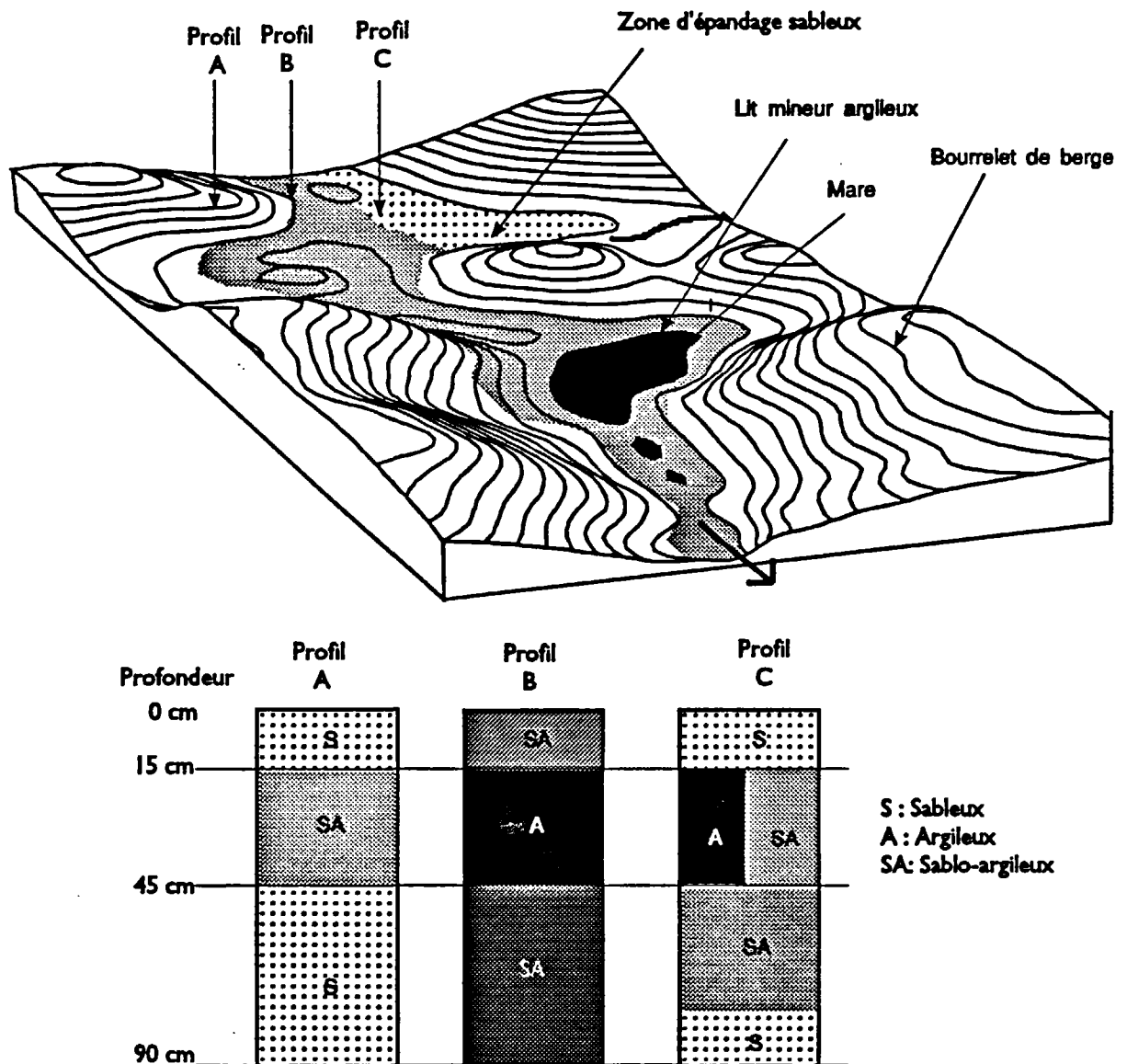
Facès granulométrique	Argiles %				Limons %				Sables fins %				Sables grossiers %				Eléments grossiers
profondeur cm	0-15	15-35	35-75	75-115	0-15	15-35	35-75	75-115	0-15	15-35	35-75	75-115	0-15	15-35	35-75	75-115	
projet Yatenga (partie aval Améné, BV 150km ²)																	
versants	9	10	12	18	17	18	21	19	57	46	45	42	17	25	19	20	40
zone centrale	52	51	47	42	40	39	38	38	6	8	12	15	2	2	3	5	0.5
projet Siné-Saloum (partie aval Keur Samba Diama, BV 75.6km ²)																	
versants	5	5	8	12	35	35	32	39	41	41	41	40	19	19	19	9	40 à 65
zone centrale	25	33	40	50	50	44	38	41	16	16	16	9	9	7	6	0	0.5
projet Mali-sud (zone centrale de Kambo en amont du barrage, BV 10km ²)																	
amont	25	28	30	37	49	37	19	22	20	20	23	13	6	15	28	28	0
aval	10	20	24	29	24	35	36	21	19	17	15	14	45	26	22	35	0
projet Comoé (zone centrale du bas-fond de Damana, BV 100km ²)																	
amont	43	44	43	42	20	16	20	26	32	34	32	22	5	6	5	10	0
aval	8	8	7	7	6	6	6	10	58	58	58	55	28	28	29	28	0
projet Casamance (zone centrale du bas-fond de Djiguioum, BV 24.6km ²)																	
amont	53	71	25	15	25	20	7	5	11	2	50	47	5	2	16	32	0
milieu	69	58	65	51	16	28	19	22	5	6	4	13	0.3	0.5	0.2	0.5	0
aval	60	59	58	45	18	21	20	14	14	15	15	24	1	1	0.3	9	0

Zone sahélienne

En zone sahélienne, à Bidi (Yatenga) et à Keur Samba Diama (Siné-Saloum), les sols des versants sont souvent sableux, sablo-limoneux à sablo-argileux, avec une charge grossière forte (40%) lorsqu'ils sont indurés ou concrétionnés. Dans la partie amont des bas-fonds, les sols d'apport colluvio-alluvial sont sablo-limoneux en surface, argileux en profondeur avec une charge grossière faible (10%).

Dans la partie aval de la zone centrale, les sols hydromorphes à pseudo-gley sont argillo-limoneux sans charge grossière. Compte tenu de la nature sableuse des sols des versants, le colluvionnement, dans les bas-fonds sahéliens et soudano-sahéliens, s'accompagne d'un enrichissement en sables par rapport au matériel en place. Ce phénomène, discontinu dans l'espace, a tendance à prendre localement des proportions inquiétantes. Dans le bas-fond de Keur Samba Diama (figure 37), les horizons allogènes à texture sableuse particulière peuvent atteindre 50 cm d'épaisseur et recouvrent les sols argileux de la zone centrale.

Figure 37 : Morpho-pédologie du bas-fond de Keur Samba Diama (ALBERGEL & PEREZ, 1991).



Zone soudanienne

En zone soudanienne (Mali-Sud et Comoé), les sols des bas-fonds sont limono-argilo-sableux à sablo-argilo-limoneux dans la partie amont. Ils s'enrichissent en argiles dans la partie aval, mais présentent aussi de fortes hétérogénéités granulométriques. Ils peuvent être localement très sableux comme c'est le cas dans la partie centrale aval du bas-fond de Damana. En marge de la zone centrale, les sols des bas-versants sont souvent très sableux de type éluvial et correspondent aux zones d'affleurement des nappes aquifères localisées sur les versants.

Le caractère hétérogène des sols des bas-fonds soudanais constitue une contrainte majeure à leur mise en valeur agricole. En effet, la capacité des sols à l'infiltration augmente très fortement avec la diminution du taux des argiles et limons; elle est de l'ordre de:

- * 0.2 à 5 mm/h sur les sols argileux,
- * 100 mm/h sur les sols sablo-limoneux,
- * 4 000 mm/h sur les sols très sableux.

Zone Guinéenne

En Casamance, les sols de la partie amont du bas-fond de Djigoum sont argileux en surface sur une profondeur d'une trentaine de centimètres, puis sableux en profondeur. Dans la partie aval, le caractère argileux des sols de bas-fond se maintient en profondeur avec cependant un léger enrichissement en sable (texture argilo-sableuse à 30% de sable). L'existence d'un horizon organique enfoui dans certains sols atteste de la présence d'anciennes mangroves et du comblement de la vallée par des matériaux colluvionnés en provenance des plateaux. En marge de la zone centrale, les sols des bas-versants (planche couleur 2) présentent un faciès sableux généralisé. Ils sont appelés gris hydromorphes de type éluvial; ils s'apparentent aux sols des bas-versants de la zone soudanaise et correspondent également aux zones d'affleurement des nappes aquifères.

STRUCTURE DES SOLS DE BAS-FONDS

La structure est décrite à l'échelle macroscopique par la taille des agrégats, leur forme et leur agencement, par la taille et la forme des pores et des fissures. La porosité tubulaire est engendrée par l'activité biologique animale: rongeurs, vers, fourmis, termites et par l'activité biologique végétale sous l'action des racines. La porosité fissurale est engendrée par la dessiccation des argiles gonflantes (vermiculite, montmorillonite).

Seuls les projets Yatenga et Casamance ont procédé à une description structurale assez détaillée des sols de bas-fond et de versant. Au Mali et dans la Comoé, la description des profils pédologiques ne permet que de placer la profondeur des indurations ferrugineuses.

Les indurations ferrugineuses

Dans toute l'Afrique de l'Ouest, l'induration ferrugineuse affecte tous les sols de versant et dans une large partie ceux des plateaux. Selon l'intensité de l'induration, on distingue:

- la cuirasse qui forme une masse compacte très dure, difficile à briser au marteau,
- la carapace, dont la dureté est moindre que celle de la cuirasse et que l'on brise assez facilement au marteau,
- les indurations en taches non jointives formant des masses compactes en sec, friables en humide.

L'existence d'une cuirasse à faible profondeur gêne l'enracinement des plantes et constitue un facteur limitant pour la mise en culture, d'autant plus limitant que la cuirasse constitue également un horizon d'arrêt pour l'infiltration. Au cours d'une averse, la saturation rapide de l'horizon superficiel provoque un fort ruissellement et une aggravation de l'érosion des sols nus mis en culture. Sur carapace, l'enracinement peut profiter des vides existant entre les amas indurés. Il est donc nettement moins entravé que sur cuirasse et la saturation des sols reste localisée. Dans les indurations ferrugineuses en amas non jointifs, l'enracinement est peu gêné par les indurations. L'infiltration peut même être favorisée par une granulométrie plus grossière des horizons supérieurs à l'induration.

Tous les bas-fonds des projets pilotes possèdent sur leur versants des indurations ferrugineuses à des profondeurs variables:

- Au Yatenga, dans la région de Bidi, les indurations ferrugineuses se situent sur les versants à des profondeurs inférieures à 2 mètres; de l'ordre de 50 cm à 1 mètre dans le bas-fond de Bidi-Gourga.
- Au Mali-Sud et dans la Comoé, les indurations ferrugineuses se situent à des profondeurs de 1 m à 1.5m pour Kambo, Moadougou et Kawara, avec des seuils par endroits.
- En Casamance, le système cuirassé est plus profond (figure 36). Il se situe à plus de 4 mètres de profondeur sur les versants du bas-fond de Djiguinoum.

La remontée de la cuirasse ferrugineuse près de la surface du sol de part et d'autre de la zone centrale d'un bas-fond coïncide souvent avec un rétrécissement de la zone centrale et constitue donc un facteur favorable pour l'installation d'un barrage ou d'une digue. Les indurations ferrugineuses, qui résultent des phénomènes de battement de la nappe et de l'alternance des phases de saturation et de dessiccation, disparaissent généralement dans la partie aval de la zone centrale des bas-fonds. Elles réapparaissent dans la zone centrale de la partie amont.

Ainsi, dans la zone centrale du bas-fond de Kambo, dont la superficie est de 10km², la cuirasse se situe entre 2.5 et 4m de profondeur et la remontée de la cuirasse constitue un facteur favorable à l'implantation d'un barrage demi-souterrain.

Description structurale des sols

En zone soudano-sahélienne sèche (Yatenga), les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés ont une structure massive quand ils sont sableux, une structure polyédrique subangulaire lorsqu'ils sont sablo-argileux. Les racines y sont peu nombreuses et l'activité biologique peu développée. Au Siné-Saloum, les sols ferrugineux tropicaux lessivés ont une structure massive et une activité biologique intense marquée, dans les profils pédologiques, par de nombreuses galeries de termites et de nombreuses racines. Les sols évolués d'apport alluvial hydromorphes du Yatenga ont une structure polyédrique subangulaire bien marquée, une activité biologique bien développée et une forte densité racinaire sur une profondeur de 60 cm. Les sols hydromorphes à pseudo-gley de la partie aval des bas-fonds soudano-sahéliens ont une structure polyédrique angulaire très fortement développée, des racines présentes sur tout le profil, mais une faible activité biologique.

Dans les bas-fonds de Casamance, les horizons sableux présentent une structure massive, une faible porosité et une absence d'activité biologique. Les horizons argileux profonds sont caractérisés par une absence de structures et de porosité biologique. Les horizons argileux superficiels ont une structure granuleuse fine, localement polyédrique. Ils sont gras au toucher et contiennent beaucoup de matière organique. La porosité biologique y est forte et l'enracinement très développé (BOIVIN P., 1991).

CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DES SOLS

La phase liquide d'un sol se caractérise par une variabilité temporelle et spatiale de son volume et de sa composition (MUSY A. & SOUTTER M., 1991). La dynamique globale de la phase liquide contribue à l'alimentation en eau du sol (pluie, écoulements superficiel et souterrain) ou à la vidange du stock hydrique du sol (évaporation, évapo-transpiration et drainage). La quantification du bilan hydrique des sols constitue un aspect central des applications de la physique du sol. Les principales caractéristiques hydriques des sols du programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds du Sahel sont reportées dans le tableau XXIII.

Tableau XXIII: Caractéristiques hydriques des sols de bas-fonds

	Humidité volumique %		Réserve utile mm		ETR mm/j	Hydrodynamique			Simulation de pluie	
	PF 4.2	PF 2.5	Sorgho 1m	Riz 50cm	0.8ETP	Muntz mm/h	Casters mm/h	Nappe mm/h	Vi mm/h	Ki %
Projet Yatenga (Bidi - Gourga)										
Versants	19	30	110	---	4.7	---	---	3.3	---	---
Zone centrale	21	36	150	75		---	3.5		---	---
Projet Siné-Saloum (Thysse Kaymor)										
Versants	9	19	100	---	4.0	100	---	---	30	75 à 50
Zone centrale	10	31	210	107		25	2.0	---	4	15
Projet Mali-Sud (Kambo) zone centrale										
Amont	---	---	---	---	3.3	60	1.7	1.5	---	---
Aval	---	---	---	---		120	3.0	---	---	---
Projet Comoé (Damana) zone centrale										
Amont	27	36	90	50	3.3	13	0.5	0.3	---	---
Aval	9	15	60	30		76	2.5	1.5	---	---
Projet Casamance (Djigulnoum)										
Versants	---	---	100	50	3.3	150	---	0.2	38	57
Zone centrale	---	---	---	---		30	---	0.2	48	82

Vi vitesse moyenne d'infiltration ETR = 0.8 ETP pour une culture en phase de fructification
 Ki coefficient d'infiltration sol humide

Pour pouvoir interpréter les valeurs fournies sur le tableau ci-dessus, nous allons passer en revue les définitions des principaux paramètres qui caractérisent le fonctionnement hydrique des sols.

LA TENEUR EN EAU ET LE POTENTIEL DE PRESSION

La teneur en eau volumique ou humidité volumique.

L'humidité volumique (θ) est égale au rapport entre le volume de la phase liquide (V_e) et le volume total du sol (V_t)

$$(\theta) = V_e/V_t$$

Elle est exprimée en pourcentage. La teneur en eau volumique varie entre une valeur minimale appelée teneur en eau résiduelle ($\theta_{\min}$) et une valeur maximale appelée teneur en eau à saturation (θ_s). Sur une même verticale, la teneur en eau varie en fonction de la profondeur. Le profil hydrique présente graphiquement la distribution des teneurs en eau en fonction de la profondeur sur une même verticale. La surface comprise entre 2 profils hydriques successifs représente la variation de stock hydrique du sol entre les dates correspondant aux deux profils.

Dans la pratique, on caractérise un sol par le stock hydrique disponible pour les plantes en associant à la notion de teneur en eau celle de potentiel de pression.

Potentiel de pression et teneur en eau

La dynamique de la phase liquide d'un sol résulte de l'action des forces auxquelles elle est soumise: forces de gravité, de capillarité et d'adsorption.

- Un sol inondé subit une pression hydrostatique supérieure à la pression atmosphérique.
- Dans un sol exondé non saturé, la phase liquide est soumise à une pression inférieure à la pression atmosphérique qui résulte des forces de capillarité et d'adsorption.

La notion de potentiel de pression fait référence à la pression atmosphérique. Il est positif dans les zones saturées où il est appelé potentiel de gravité. Il est négatif dans les zones désaturées où il est appelé potentiel de pression matricielle. Du fait de la grandeur des forces de capillarité et d'adsorption, le potentiel de pression matricielle (h) atteint les valeurs négatives extrêmement élevées. L'utilisation du logarithme décimal de l'opposé de la charge de pression ($-h$), appelé pF , permet de simplifier son expression:

$$pF = \log_{10} (-h) \text{ où } h \text{ est exprimé en cm.}$$

La figure 38 précise l'allure générale des relations entre la pression matricielle h et la teneur en eau d'un sol sableux et d'un sol argileux.

Pour des potentiels de pression inférieurs à -15850 cm ($pF = 4.2$), les végétaux ne parviennent plus à extraire l'eau matricielle des sols. La teneur en eau du sol correspond à cette capacité maximale moyenne de succion des végétaux, est appelée point de flétrissement permanent (θ_p).

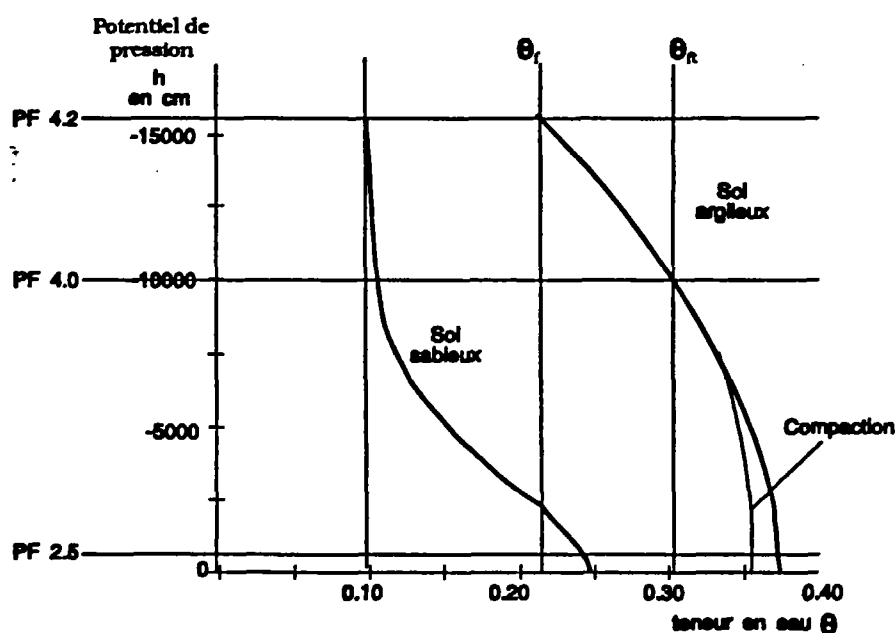
Pour les potentiels de pression inférieurs à -316 cm ($pF = 2.5$), l'écoulement gravitaire s'arrête. La teneur en eau du sol correspondant à l'arrêt de l'écoulement gravitaire est appelée capacité de rétention (θ_r).

La teneur en eau du sol correspondant au seuil d'humidité en deçà duquel commence le flétrissement, sans que la plante ne subisse de dommages irréversibles, est appelée point de flétrissement temporaire (θ_n). En moyenne, elle correspond à un potentiel de pression égal à -10000cm ($pF = 4.0$).

- pour un sol sableux, il y a peu de différence entre le point de flétrissement permanent (θ_p) et le point de flétrissement temporaire (θ_n);
- pour un sol argileux, la différence est sensible et peut atteindre 10%.

Le tableau XXIII fournit les valeurs de l'humidité volumique au point de flétrissement permanent ($pF = 4.2$) et la capacité de rétention ($pF = 2.5$) pour les sols des projets Yatenga, Siné-Saloum et Comoé.

Figure 38 : Potentiel de pression matricielle en fonction de la teneur en eau pour un sol sableux et un sol argileux



Réserve utile et réserve facilement utilisable.

L'évaporation et l'évapo-transpiration des plantes provoquent une diminution de la teneur en eau du sol jusqu'au point de flétrissement temporaire puis jusqu'au point de flétrissement permanent. Au delà de cette limite les plantes annuelles cultivées subissent des dommages irréversibles.

La réserve utile (RU) est l'intégration en fonction de la profondeur, sur l'horizon racinaire (z), des écarts entre la teneur en eau à la capacité de rétention (θ_{max}) et la teneur en eau au point de flétrissement permanent (θ_p).

$$RU = \int (\theta_{max} - \theta_p) dz$$

La réserve facilement utilisable (RFU) est l'intégration en fonction de la profondeur, sur l'horizon racinaire (z), des écarts entre la teneur en eau à la capacité de rétention (θ_{max}) et la teneur en eau au point de flétrissement temporaire (θ_r).

$$RFU = \int (\theta_{max} - \theta_r) dz$$

RU et RFU sont exprimés en mm.

Dans la pratique, on utilise souvent les relations suivantes:

$$RU = 1/2 z \cdot \theta_{max} \text{ et } RFU = 1/3 z \cdot \theta_{max} = 2/3 RU$$

La profondeur d'enracinement des cultures varie selon le type de culture. Pour le riz pluvial, elle est de l'ordre de 50 cm et pour le sorgho, de l'ordre de 1 à 1.5 m. Pour le riz inondé, la notion de réserve utile n'a pas de sens car le riz inondé, en raison du parenchyme lacunaire de ses racines, commence à souffrir de stress hydrique dès que l'humidité du sol est inférieure à environ 80% de l'humidité de saturation (θ_s). Sur le tableau XXIII nous avons reporté la réserve utile sur une tranche de sol de 1 mètre, correspondant à la possibilité de culture du sorgho dans le Yatenga et de maïs dans le Siné-Saloum et le sud du Mali. Les valeurs de la réserve utile pour le sorgho et le maïs sont de l'ordre de 90 à 110 mm. Sur les sols très sableux, en aval du bas-fond de Damana, elle tombe à 60 mm. Pour le riz pluvial, l'enracinement étant de l'ordre de 50 cm, le calcul de la réserve utile a été effectué sur cette profondeur. Elle est égale à 90 mm dans la zone centrale du bas-fond de Bidi, à 50 mm en amont dans le bas-fond de Damana et 30 mm en aval.

En fin de leur cycle végétatif, l'évapo-transpiration réelle des cultures (ETR) étant de l'ordre de 0.8 fois l'ETP, on peut estimer l'ETR à :

- 5 mm par jour au Yatenga,
- 4 mm par jour au Siné-Saloum,
- 3.5 mm par jour dans les autres régions.

Dans ces conditions, la réserve utile du sol ayant correctement été rechargée, les plantes peuvent consommer la réserve facilement utilisable du sol ($RFU = 2/3 RU$) sans subir de préjudice important. Il est donc possible de calculer théoriquement cas par cas la durée de la période de sécheresse supportée par la plante sans recharge des réserves utiles du sol.

- Dans le Yatenga, le sorgho qui dispose d'une réserve utile de 110 mm, peut théoriquement supporter une sécheresse de 15 jours en fin de cycle. Le riz pluvial de la zone centrale du bas-fond de Bidi aurait alors une autonomie de 12 jours.
- Dans la Comoé, le maïs dispose d'une réserve utile de 90 mm et peut théoriquement supporter une sécheresse de 17 jours. Sur les parties sableuses, son autonomie n'est que de 11 jours. Dans le bas-fond de Damana, le riz pluvial, qui dispose d'une réserve utile de 50 mm, peut théoriquement supporter une sécheresse de 9 jours. Sur les sols sableux, son autonomie tombe à 6 jours.

LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LES SOLS

Réalimentation superficielle

Contrairement aux cultures de plateau et de versant pour lesquelles l'alimentation hydrique des sols n'est assurée que par la pluie, les cultures de bas-fond bénéficient d'une triple alimentation :

- par infiltration des eaux pluviales,
- par infiltration des eaux de crues des marigots,
- par remontée des nappes aquifères.

Pour estimer les quantités d'eau infiltrées à partir des eaux pluviales, le simulateur de pluie (A. CASENAVE & C. VALENTIN, 1989) constitue un excellent outil de mesure directe. La vitesse d'infiltration (V_i) et le coefficient d'infiltration (K_i) dépendent principalement de l'état de surface des sols et de leur degré d'humectation, secondairement de l'intensité pluviométrique. Des mesures au simulateur de pluie ont été effectuées au Siné-Saloum et en Casamance.

Pour estimer les quantités d'eau infiltrées par submersion des sols, les hydro-pédologues utilisent souvent l'infiltromètre Muntz, qui permet de mesurer la vitesse stabilisée d'infiltration d'un sol qui est comprise entre $1/3$ et $2/3$ de la conductivité hydraulique à saturation (K_s). Les valeurs mesurées in situ figurent sur le tableau XXIII. Sur les sols argilo-limono-sableux, la vitesse d'infiltration stabilisée varie de 150 mm/h à Djiguioum, à 120 mm/h à Kambo et 100 mm/h à Thyse Kaymor.

Le drainage:

dans la zone non saturée

La plupart des processus de transfert d'eau dans les sols se déroulent dans des conditions caractérisées par une teneur en eau inférieure à la saturation ($\theta < \theta_s$) c'est à dire par l'existence d'une phase liquide et d'une phase gazeuse occupant simultanément l'espace poral. La force motrice de l'écoulement en milieu non saturé est alors la somme des potentiels de pression matricielle et de gravité. La conductivité hydraulique, qui caractérise l'aptitude d'un sol à l'écoulement de l'eau, varie alors en fonction de la teneur en eau. Elle croît de façon exponentielle pour atteindre sa valeur maximale à saturation. Les méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ des sols non saturés sont maintenant bien au point (VACHAUD & al., 1978) et permettent l'obtention des courbes $K(\theta)$ et $h(\theta)$ avec une bonne précision. Ces méthodes ont été utilisées dans le Siné-Saloum sur les sols de plateau et les versants (ALBERGEL & al., 1989).

dans la zone saturée.

Pour estimer le drainage dans les sols saturés des bas-fonds, les hydrologues et les agronomes du programme CCE ont mesuré directement la descente des niveaux de l'eau dans les casiers rizicoles et dans les piézomètres. Les valeurs observées de descente des niveaux de l'eau dans les casiers rizicoles (tableau XXIII) varient entre 2.0 et 3.2 mm/h au Yatenga et dans le Siné-Saloum, 0.5 et 3.0 mm/h dans la Comoé et le sud du Mali. Elles sont légèrement supérieures aux vitesses de descente des nappes aquifères qui sont de l'ordre de:

- 3.3 mm/h dans le bas-fond de Bidi-Gourga,
- 0.3 à 1.5 mm/h dans les bas-fonds de la Comoé,
- 0.2 à 0.25 mm/h dans le bas-fond de Djigunoum.

La connaissance des vitesses de descente des niveaux de l'eau dans les casiers rizicoles permet de connaître la durée de la période pendant laquelle le riz inondé, en l'absence d'alimentation en eau du casier, peut se développer sans risque de stress hydrique.

En zone soudano-sahélienne, pour un riz inondé, la profondeur d'enracinement étant de 25cm, à partir du jour de dénolement du casier, le système racinaire du riz reste noyé pendant 5 jours à Thyse Kaymor, 3 jours à Bidi-Gourga.

En zone soudanienne, sur les sols argileux, le système racinaire du riz inondé reste noyé pendant 21 jours dans les sols les plus argileux, pendant 6 jours dans les sols argilo-sableux; sur les zones sableuses, le système racinaire peut-être exondé au bout de 3 jours.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES SOLS DE BAS-FONDS

LES ANALYSES CHIMIQUES

Les résultats d'analyses chimiques effectuées sur les sols de bas-fond du programme de mise en valeur des bas-fonds au Sahel sont consignés dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV : Chimie des sols de bas-fonds

Types de mesure	Acidité		Eléments nutritifs en meq/100g				Complexe absorbant en meq/100g			Fertilité organique				Conductivité mS/c	Toxicité		
Elément	pH		Ca++	Mg++	K+	Na+	S	CEC (l)	S/T %	Mo pm	N pm	C/N	P2O5 ass		Fe tot	Al3+ meq	S pm
Projet Yatenga (Amont : Gourga, Aval : Améné)																	
Versant	5.9	6.4	2.3	1.0	0.07	0.10	3.5	4.8	73	8.4	0.3	10	4.0	---	88	---	---
Centre Amont	6.0	5.8	2.8	1.5	0.03	0.14	4.5	8.8	51	16.4	0.8	11	---	---	---	---	---
Centre Aval	5.8	6.8	3.8	1.5	0.10	0.13	5.5	9.5	58	12.1	1.2	2.5	5.0	0.05	46	---	---
Projet Siné-Saloum																	
Versant	5.0		0.66	0.19	0.10	0.01	0.96	1.9	50	<10	0.25	---	20	---	---	---	---
Centre	5.7		5.5	1.12	0.14	0.04	6.8	6.9	99	---	1.36	---	129	---	---	---	---
Projet Mali Sud (Zone centrale de Kambo)																	
Centre	5.2	5.0	3.2	0.61	0.20	0.40	4.4	11.0	40	12.6	1.3	10	9.2	---	---	---	---
Projet Casamance (zone centrale)																	
Amont 0-18cm	4.0	6.5	3.1	0.7	0.2	0.6	4.6	6.8	67	37	1.9	11.4	---	0.21	---	3.7	---
Aval 0-12cm	4.0	2.5	Sels solubles				---	---	---	52	1.8	16.8	---	2.4	---	1.3	2.4

Pour être interprétés, ces résultats doivent être comparés aux normes ORSTOM ou à celles du BUNASOLS (1990) utilisées au Burkina Faso. Les deux classifications sont à peu près équivalentes. Nous utiliserons les normes ORSTOM plus complètes que les secondes. Nous examinerons successivement les différents paramètres permettant de caractériser la fertilité chimique des sols de bas-fonds. Un paragraphe spécial sera consacré aux sols sulfatés acides de basse Casamance et à leur régénération par dessalement.

INTERPRETATION DES ANALYSES CHIMIQUES

Acidité, pH

La première colonne du tableau XXIV indique les valeurs de pH mesuré en surface et en profondeur.

Les sols des régions soudano-sahéliennes sont moyennement acides en surface, faiblement acides en profondeur. L'acidité diminue des versants vers les bas-fonds. Seuls les sols des versants dans le Siné- Saloum sont fortement acides.

En zone soudanienne, les sols de bas-fond sont fortement acides en surface et en profondeur. Ils peuvent être localement très acides ou moyennement acides.

En Casamance, les sols hydromorphes de la partie amont du bas-fond de Djiguioum sont extrêmement acides en surface, faiblement acides en profondeur. Les sols de la partie aval du bas-fond, extrêmement acides en surface, le sont encore plus en profondeur où les valeurs du pH peuvent atteindre 2.5.

Éléments nutritifs, complexe absorbant

En zone soudano-sahélienne, les sols des versants sont pauvres en calcium et magnésium, carencés en sodium et potassium au Yatenga. Leur pauvreté s'accroît dans le Siné-Saloum. La teneur en sels minéraux s'améliore dans les bas-fonds où les sols sont moyennement riches en calcium et magnésium, mais restent pauvres à très pauvres en sodium et potassium.

Au sud du Mali et en Casamance, les teneurs en sels minéraux sont moyennes dans les bas-fonds, faibles pour le magnésium.

La somme des bases échangeables est moyenne à faible dans tous les bas-fonds. Elle est faible à très faible sur les versants.

La capacité d'échange est faible dans tous les bas-fonds à l'exception du bas-fond de Kambo. Le taux de saturation est moyen; il n'est fort qu'en Casamance.

Tous les sols analysés dans le cadre du programme CCE sont fortement carencés en phosphore assimilable à l'exception des sols du bas-fond de Thyse-Kaymor.

Fertilité organique

Les sols des versants sont très pauvres en matières organiques et en azote avec des teneurs inférieures à 10 pour mille en matière organique, 0.5 pour mille en azote. Les sols des bas-fonds soudano-sahéliens et soudaniens sont relativement plus riches en matières organiques et azote que les versants, mais ils restent pauvres. Les sols des bas-fonds de Casamance sont riches à très riches en matière organique et en azote en raison de la dynamique très particulière de la mangrove.

LES SOLS SULFATES ACIDES DE BASSE CASAMANCE

Genèse

Les sols sulfatés acides de basse Casamance sont des sols de mangrove. Le terme de mangrove désigne une formation végétale composée de palétuviers se développant en milieu fluvio-marin. Les sédiments marins de mangrove sont tous caractérisés par l'accumulation en leur sein de soufre (VIEILLEFON, 1977; MARIUS, 1980). Cette accumulation est favorisée par les racines des palétuviers, plus particulièrement celles de l'espèce *Rhizophora*: le soufre de l'eau de mer est fixé sous forme de pyrite par des bactéries sulfato-réductrices. Lorsque ces sédiments sont exondés, l'oxydation de la pyrite libère des ions SO_4^{--} et H^+ provoquant une chute du pH du sol qui peut passer en quelques semaines de 6 à 2. Au cours de l'oxydation, la pyrite fixée à proximité des racines de *Rhizophora* se transforme en jarosite (minéral jaune pâle) produit des hydroxydes de fer qui épigénisent les racines de *Rhizophora*: formant dans les sols des tuyaux bouchés appelés "iron pipes". La composition chimique et l'état d'oxydo-réduction des sols de mangrove les rendent très fragiles. Leur stabilité est assujettie au maintien des conditions de submersion. Leur conservation interdit donc toute poldérisation ou abaissement naturel des niveaux d'eau (BOIVIN, 1991).

Depuis 1968, le déficit pluviométrique en Casamance se caractérise par une réduction d'environ 25% des précipitations et l'abaissement moyen annuel du niveau des nappes superficielles a été estimé entre 0.5 et 1 mètre (LE PRIOLLE, 1983) entre 1970 et 1980. En saison sèche, le niveau des nappes aquifères se retrouve maintenant à une cote inférieure à celle des eaux salées de surface qui pénètrent dans les bas-fonds à chaque marée. Les nappes salées, qui se retrouvent sous les sols des bas-fonds, ont provoqué la salinisation des sols par remontée capillaire et évaporation. L'abaissement des nappes a favorisé l'oxydation des sols provoquant une violente acidification. En surface, on y observe la précipitation des sulfates d'aluminium, de magnésium et de fer, la capacité d'échange des argiles étant saturée par l'aluminium échangeable. Les fortes teneurs en aluminium étant toxiques pour le riz, de grandes superficies de bas-fond ont ainsi été abandonnées en basse Casamance.

Les sols du bas-fond de Djiguinoum

Dans le bas-fond de Djiguinoum, la présence de sels solubles et de soufre permet de différencier deux grands ensembles de sols:

- les sols hydromorphes,
- les sols sulfatés acides (planche couleur 2).

*** les sols hydromorphes "sensu stricto" (104 hectares)**

Ces sols sont situés dans la partie supérieure de la vallée et dans la zone de raccordement du plateau au bas-fond. Ils sont pour la plupart occupés par les rizières. Ils peuvent présenter des signes de contamination par le sel, notamment dans les horizons inférieurs. Ils sont en général peu salés, sauf lorsqu'ils sont proches du lit du marigot. Certaines zones présentent en surface des efflorescences blanches de sulfates d'aluminium (tamarugite, alunite), mais, dans l'ensemble, l'aluminium échangeable est très peu présent. Le pH est généralement acide avec des valeurs situées entre 4 et 6.5.

*** les sols sulfatés acides (36 hectares)**

Ils sont caractérisés par une teneur en soufre total importante et par la présence ou non d'un sulfate de fer: la jarosite. Ce minéral constitue un indicateur du degré d'évolution chimique des sols sulfatés acides. Cette évolution est liée aux conditions oxydantes favorisées par une exondation artificielle des sols. Leur maturation physique, marquée par une structuration du matériau de surface, en est également une conséquence. L'acidification est généralisée: le pH est inférieur à 4.5 et diminue avec la profondeur, les valeurs pouvant atteindre 2.5. L'aluminium échangeable est partout présent avec des teneurs élevées en profondeur (>10 méq/100 g). Ces sols sont tous salés, les valeurs de salinité augmentant avec la profondeur et pouvant devenir très élevées (>10 mS/cm). Ils se répartissent principalement dans la partie centrale de la vallée, le long du marigot. Ils peuvent être nus ("tanne vif") ou bien occupés par une végétation acidophile ("tanne herbeux"). Celle-ci est composée de cypéracées, en particulier *Eleocharis mutata*.

Un type de sol particulier est mentionné en bordure de vallée et au niveau de petits îlots. Il s'agit des sols de terrasse limono-sableux en surface et sableux en profondeur (13 hectares). Ils ne sont pas salés et présentent un pH compris entre 4 et 5 avec des teneurs en aluminium échangeable inférieures à 1 méq/100g.

Les sols sulfatés acides du bas fond de Djiguinoum ont été abandonnés et ne sont plus cultivés. La réhabilitation de ces sols salés par optimisation du lessivage en suivant l'évolution de leur caractéristiques chimiques pour éviter leur hyper-acidification était l'objectif principal du projet pilote Casamance.