

3.3 LA PEDOLOGIE DU SAHEL ET DU TERRAIN D'ETUDE

3.3.1 *Introduction*

Des aspects pédologiques qui contribuent à la compréhension et à la quantification de la production primaire au Sahel sont décrits sur 2 échelles. La description sur une grande étendue (petite échelle) a pour but de:

- présenter une idée générale des paysages sahéliens, des unités géomorphologiques et des sols;
- présenter suffisamment d'informations sur les caractères des sols d'une région assez vaste afin que nous puissions extrapoler nos connaissances sur une plus grande région et ainsi nous pouvons indiquer quelques options techniques pour améliorer la production primaire des pâturages (voir chapitre 8).

La description détaillée (grande échelle) donnera toute l'information sur le sol qui sera utilisée dans les chapitres suivants. Cette information est indispensable pour la compréhension de la production primaire.

Cette partie n'est pas du tout une vraie description pédologique complète avec par exemple une classification des sols. On essaie d'être assez simple et pratique pour être utile dans l'ensemble de la recherche pluri-disciplinaire.

3.3.2 *Pédologie du Sahel*

La plupart du Sahel est située juste au nord du socle précambrien d'Afrique Centrale et doit être considérée comme une série de grandes dépressions (synclinales) qui sont remplis avec des produits d'érosion du socle depuis le précambrien. Cela explique pourquoi le Sahel est plat dans l'ensemble.

Les sédiments plus âgés sont souvent transformés en roche (par exemple grès) ou dans des conditions climatiques humides transformés en latérite. Dans les périodes géologiques suivantes avec des conditions plus sèches l'érosion a attaqué à nouveau le matériel et de nouveaux sédiments sablonneux, limoneux ou argileux sont formés. L'histoire du Sahel est si longue et compliquée que divers cycles de formation et d'érosion se sont produits. Un des derniers dépôts importants s'est formé au Tertiaire et est nommé Continental Terminal, mais pour nos études c'est surtout la couche superficielle du sol qui semble intéressante. Le sol en profondeur, surtout domaine de la géologie, est intéressant du point de vue de la nappe d'eau, du débit des puits et des forages mais il n'est pas considéré ici (voir partie 8.3). Les faits géologiques les plus importants sont schématisés à la fig. 3.3.1.

Vu l'importance sur le relief actuel donc sur l'hydrographie actuelle, les formations du quaternaire ne sont pas à négliger. Une des plus importantes formations encore présentes sur le terrain est l'erg récent. A la fin du Pleistocène, dans la période glaciaire nommé Würm (15.000 ans avant J.-C.) le climat du Sahel était aride, saharien. L'activité des fleuves était nulle. De grandes dunes longitudinales (ergs récents) étaient formées avec du matériel fluviatile, du sable avec une texture moyenne à grossier. Les cours secs des fleuves le Niger, le Baoulé et la Volta Noire qui tous coulaient du sud vers le nord, étaient complètement bloqués par ces dunes (Michel, 1973).

Fig. 3.3.1. Périodes géologiques importantes, avec les processus schématisés. Le noir indique les dépôts sédimentaires.

Climat	Tertiaire humide	Würm sec	Atlanticum humide	Subboréal sec
Fleuves	actifs S → N	néant	à cause de blocage changent de cours S → N → S	secs
Erosion	par l'eau S → N	par le vent N → S	par l'eau	par le vent N → S
Formation	Sahel: dépôts sablonneux, argileux (Continental terminal) savane: latérite	ergs récents	Delta du Niger dépôts fluviatiles lacustres	couverture éolienne limon/sable dunes

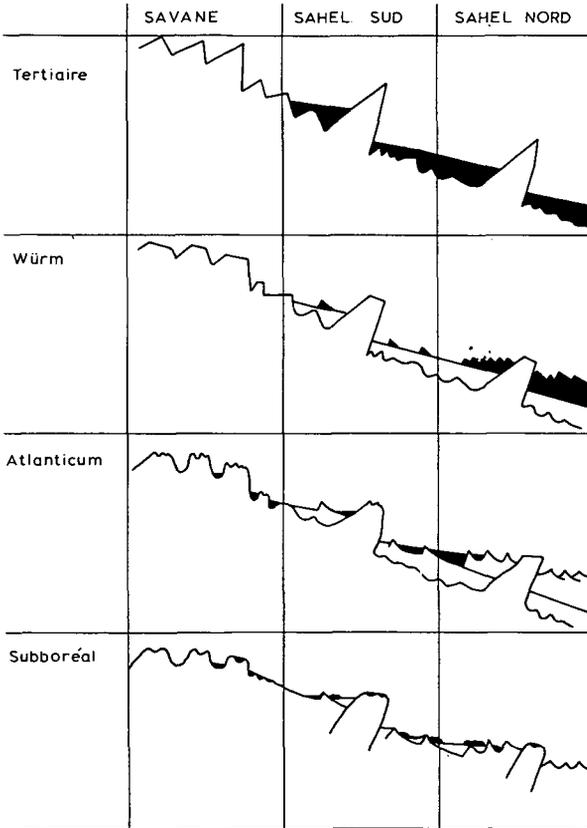


Fig. 3.3.1. Important geological periods, with the processes schematized. Sedimentary deposits are indicated in black.

Climate	Tertiary humid	Würm dry	Atlantic humid	Sub-Boreal dry
Rivers	active S → N	none	because of blockage changing their course S → N → S	dry
Erosion	by water S → N	by wind N → S	by water	by wind N → S
Sahel formation:	sandy deposits, argillaceous (Continental terminal) savanna: laterite	recent ergs	Niger Delta fluviatile deposits lacustres	aeolian cover loam/sand dunes

Au début de l'Holocène, de 8.000 à 5.000 ans avant J.-C., une période humide, l'Atlantique, existait. Les fleuves comme le Niger, le Baoulé et la Volta Noire reprennent leurs activités mais à cause du blocage, trouvent un autre cours en direction sud. On a estimé qu'à la transition de l'âge Würm à l'Atlantique des mouvements tectoniques ont aidé à changer la topographie du Sahel (Lang, 1972). Dans cette période humide avec de grands débits des fleuves, le Delta central du Niger est formé. A côté des nombreux bras du Niger, des berges sont formées et plus loin une grande superficie du Sahel est couverte avec des dépôts fluviatiles et lacustres. Contrairement à la période sèche où l'action d'érosion domine, la formation et la stabilisation du profil du sol sont importantes au cours de cette période humide. Sous une végétation abondante il se produit une ferruginisation dans les ergs récents.

L'Atlantique est suivi par une autre période sèche, le Subboréal de 5.000 à 2.000 ans avant J.-C. L'action d'érosion domine encore et les ergs récents s'érodent et tous les dépôts fluviatiles sont couverts par une couche plus ou moins profonde de sable éolien. Le Delta central se dessèche et les dépôts argileux se rétractent en séchant. La différence de niveau entre les berges et la plaine argileuse augmente et des dunes sont formées sur les berges.

Le Subboréal est suivi par le Subatlantique de 2.000 ans avant J.-C. à nos jours, période semi-humide. Le Delta est encore en fonction partiellement, et le Sahel est couvert d'une végétation. Suivant Davey (1957), le milieu sahélien se dessèche et la végétation devient moins abondante depuis quelques centaines d'années.

L'importance des périodes géologiques récentes est illustrée aussi sur la carte d'une partie du Sahel, fig. 3.3.2 (p. 50-51), au Mali entre 13-17° N et 4-9° O. Nous distinguons 3 unités principales de paysages, nommées ensembles. La distinction entre ces 3 est utile et nécessaire parce qu'il y a des différences significatives du point de vue des caractères physiques et chimiques, de la texture, de la profondeur du sol, de la compacité etc. Ces différences, causées par une différence d'origine et de géomorphologie, déterminent un milieu spécifique avec une utilisation actuelle pour l'élevage qui est spécifique, et probablement avec une potentialité future différente.

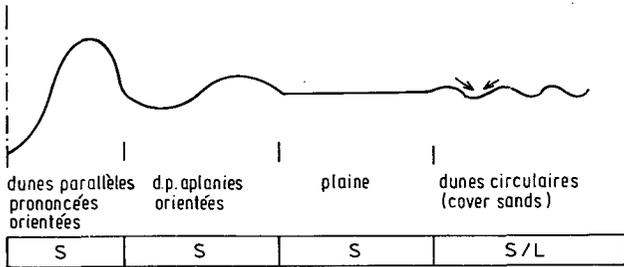
La carte (fig. 3.3.2) a été construite à l'aide des images satellites et à l'aide de nombreuses observations sur le terrain. Les sites du trajet nord-sud (partie 3.1) ont été étudiés également du point de vue pédologique (voir les points numérotés sur la carte). Ce trajet a été photographié spécialement en couleurs infrarouge en avion. Cette carte est aussi une base pour l'étude de la relation entre substrat et végétation (voir partie 6.4).

Des observations pédologiques en dehors de la région présentée ici, avaient été exécutées à l'ouest au Kaarta et à l'est au Gourma. Pour mieux comprendre l'hydrologie et surtout le ruissellement de la région, il est nécessaire et intéressant à la fois de regarder la géomorphologie des 3 ensembles distingués. La fig. 3.3.3 présente des toposéquences schématisées qui sont représentatives pour ces ensembles.

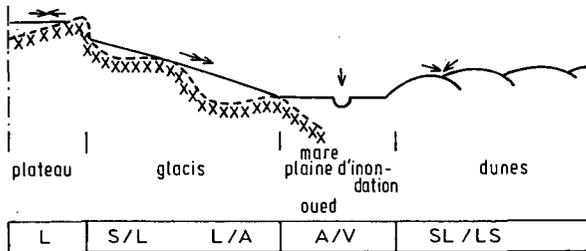
Ensemble sablonneux Cet ensemble est formé de sols sablonneux éoliens, profonds et souvent uniformes sur de vastes régions qui dominent la partie nord du Sahel. Du point de vue géomorphologie les différentes formes de dunes sont importantes. On trouve des dunes

Fig. 3.3.3. Géomorphologie des unités principales de paysage au Sahel.
 → direction du ruissellement; ××× roche; S = sable, L = limon, A = argile, V = argile
 verticale

1. Ensemble Sablonneux



2 Ensemble détritique sur grès ou latérite



3. Ensemble fluviatile ou lacustre

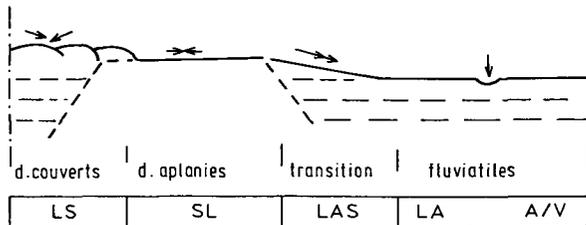


Fig. 3.3.3. Geomorphology of the principal units of the Sahel landscape.
 → direction of run off; ××× rock; S = sand, L = loam; A = clay; V = vertisol

très prononcées ou très érodées et presque plates. Les dunes peuvent être formées d'un matériel avec une texture différente (sable rouge ou jaune/blanc). Ensuite les dunes peuvent être orientées dans une direction principale comme par exemple les ergs récents, ENE - OSO, ou peuvent avoir une forme circulaire sans direction d'orientation. Dans ce cas on parle souvent de champs des dunes.

Les sols dans cet ensemble sont des sols sablonneux ou sablo-limoneux et rarement limono-sablonneux. Les sols développés sur l'erg récent ont une texture plus grossière que les sols développés sur matériaux déposés après. La surface du sol est souvent si sablonneuse que la capacité d'infiltration est grande et que le ruissellement est réduit.

L'érosion par le vent et par l'eau est réduite sauf dans la partie nord du Sahel où

se trouvent des dunes vivantes et là où la végétation était consommée ou détruite par le bétail. Ce dernier cas se présente actuellement aux alentours des points d'eau et des campements des nomades.

La végétation sur cet ensemble (voir partie 3.4) est la plus homogène des 3 ensembles distingués.

Ensemble détritique sur grès ou latérite Des sols développés sur le grès ou la latérite constituent cet ensemble. Ces sols peuvent être profonds, mais très rarement. Il y a aussi des plages nues de grès dans cet ensemble et des plages avec de la latérite dure (carapace). La plupart de ces sols sont limoneux mais très hétérogènes avec parfois un grand ruissellement. Cela se reflète dans la végétation, qui est souvent irrégulière avec des fourrés denses et des plages nues. La fameuse brousse tigrée (encore mal comprise, Leprun, 1978) fait partie de cet ensemble. Une autre conséquence est qu'il y a des endroits avec collection et stagnation d'eau où se forment des mares (temporaires) ou des plaines d'inondation. Souvent il existe un réseau de drainage par lequel une grande quantité d'eau peut sortir sous forme d'oueds.

Parfois il se produit une érosion forte, surtout par l'eau. Des régions de ce type se trouvent au Sahel, mais elles sont surtout fréquentes dans la zone de la savane au sud. Ces régions du Sahel ont souvent une faible pente, orientée vers une direction principale. C'est dans les régions dites de savane qu'une partie du bétail sahélien se trouve pendant la saison sèche.

La fig. 3.3.3 nous montre un plateau, relativement plat où le ruissellement et l'écoulement sont localisés. Aux points de collection d'eau une grande quantité peut s'infiltrer dans le sol et contribuer à la croissance des arbres. On peut y remplir aussi un réservoir d'eau qui alimente des points d'eau au pied du plateau. Les sols sont surtout limoneux. Sur la pente, nommée glacis, le ruissellement est grand et il provoque l'érosion et la dénudation de la roche mère. Au pied du glacis se trouve un bas-fond sous la forme d'une mare, une plaine d'inondation ou un oued. Les sols sur glacis sont très hétérogènes, dans la partie située en aval où se forment des sols argileux et vertiques, souvent hydromorphes. L'ensemble est souvent bordé par une connexion avec l'ensemble sablonneux. Au point de transition, le sable couvre l'argile du bas-fond où il est mélangé avec l'argile par l'activité biogène.

Pendant le Subboréal l'ensemble détritique a été couvert avec du sable éolien. Mais l'action d'une érosion suivante a dénudé cet ensemble de nouveau, et les produits d'érosion sont arrivés aux vallées dans cet ensemble ou sont transportés vers le troisième ensemble.

Ensemble fluviatile ou lacustre Cet ensemble contient des sols développés sur sédiments fluviatiles ou lacustres récents ou fossiles. Les sols sont limono-argileux en profondeur mais sont souvent couverts par une couche de limon sablonneux éolien. Dans cet ensemble les sols peuvent être hétérogènes à cause des dépôts fluviatiles, mais aussi à cause d'une couche de limon sablonneux d'une profondeur variable. En général le relief est plat, seules les couches ou dunes éoliennes ont des pentes (1-3%) aux directions diverses. Cet ensemble n'a pas un réseau de drainage, donc l'eau de ruissellement des pentes limo-

neuses se rassemble dans les plaines inondables ou dans les mares (temporaires). Cet ensemble reçoit souvent l'eau d'écoulement de l'ensemble détritique.

Le Delta central du Niger actuel fait partie de cet ensemble. Du point de vue du sol la différence entre le Delta actuel et le Delta fossile n'est pas grande, mais évidemment l'hydrographie est très différente. Ce caractère actuel ou fossile détermine aussi la fertilité. Les sols récents peuvent être très riches et les sols fossiles très pauvres. Le Delta central, unique au Sahel, fonctionne pour le bétail sahélien comme la savane. Il fournit l'eau et l'herbe pendant la saison sèche. Au Sénégal, Niger, Tchad et Soudan de telles plaines d'inondation existent aussi et les 2/3 du bétail du Sahel y vivent pendant la saison sèche (C.I.P.E.A., 1979). La fertilité du sol du Delta actuel est vraiment supérieure à celle de la savane.

Les sols de cet ensemble sont très variables, ils vont du sable jusqu'à l'argile vertique. C'est dans cet ensemble que le ranch de la Station du Sahel à Niono est situé. La plupart des expériences du projet P.P.S. sont effectuées sur des sols de ce type. Des détails de ces sols seront présentés dans la partie 3.3.3.

L'importance des 3 ensembles au Mali et au Sahel est estimée de façon très grossière:

	Mali	Sahel
Ensemble sablonneux	40%	50%
Ensemble détritique	30%	30%
Ensemble fluviatile ou lacustre	30%	20%

Pour la croissance des annuelles, la végétation sahélienne la plus importante pour le bétail, la couche superficielle du sol (0-30 cm) est la plus importante car c'est là que se trouvent 90% de son système racinaire (partie 4.5.5). Ce sont surtout les sols de l'ensemble fluviatile/lacustre, mais aussi ceux de l'ensemble détritique qui sont souvent couverts avec une couche de limon sablonneux. Donc sur un même endroit, le tapis des annuelles est souvent caractéristique pour une texture plus grossière (de la surface du sol), tandis que les arbres sont caractéristiques pour une texture fine de la profondeur du sol.

La fertilité des sols (voir tableau 3.3.1) est dans l'ensemble très basse, sauf pour les sols du Delta actuel. Les chiffres donnés dans ce tableau sont les moyennes d'un grand nombre d'échantillons du trajet nord-sud, du ranch de Niono et de la région du Gourma. (La plupart des analyses ont été faites au Laboratoire des sols de la Station de Recherches pour les Cultures Vivrières et Oléagineuses à Sotuba, Mali, avec des méthodes et des équipements standards internationaux.) Les taux de carbone (C) et azote (N) sont très bas, notamment le taux de N est tel que les méthodes d'analyse actuelles ne sont pas assez précises pour le déterminer correctement. Une discussion spéciale consacrée à la matière organique suit dans les parties 5.3 et 6.3.

La fig. 3.3.4 montre qu'il n'y a pas une variation du taux de N du sol (0-20 cm) du nord du Sahel vers le sud. Nous avons constaté aussi qu'il n'y a pas une relation entre le taux de N et le taux d'argile des sols. La même fig. 3.3.4 montre la relation entre le taux de C et le taux de N et donc donne l'information du rapport C/N de la matière orga-

Tableau 3.3.1. Caractères chimiques des sols du Sahel (couche 0-30 cm).

		Ensemble sablonneux	Ensemble détritique sur grès ou latérite		Ensemble fluviatile ou lacustre					
			Sahel	savane	fossile				Delta actuel	
					LS	LS*	LS	LAS	LA	A
		S(L)								
Carbone (C)	(g kg ⁻¹)	1,2	1,7	3,7	2,5	2,5	3,5	4,0	13	
Azote (N)	(g kg ⁻¹)	0,2	0,2	-	0,5	0,3	4,0	0,4	1,2	
Rapport de masse C/N		6	9	-	5	8	9	10	11	
P-total	(mg kg ⁻¹)	50	67	31	70	85	125	170	320	
P-Bray II	(mg kg ⁻¹)	6	5	4	7	5	2	2	2	
K-assimilable	(mg kg ⁻¹)	60	60	84	70	65	90	-	80	
pH-eau		6,8	5,7	6,3	6,0	5,9	5,0	5,9	5,5	
pH-KCl		5,7	4,4	5,0	4,8	4,4	3,7	4,3	3,9	
CEC du sol (pH = 7) (meq kg ⁻¹)					30	60	110	170	180	
Rapport Na/CEC					-	-	-	-	-	
Rapport K/CEC					0,07	0,04	0,03	0,05	0,02	
Rapport Ca/CEC					0,60	0,45	0,35	0,45	0,38	
Rapport Mg/CEC					0,30	0,21	0,32	0,35	0,18	
Saturation en bases					1,0	0,70	0,70	0,85	0,60	

S = sable, L = limon, A = argile

*Situés en dehors de la région de recherche. Estimé sur la base de quelques échantillons seulement.

Table 3.3.1. Chemical characteristics of Sahel soils (0-30 cm layer).

S = sand, L = silt, A = clay

*Situating outside the research area. Estimations based on a few samples only.

Fig. 3.3.4. La relation entre le taux d'azote du sol (020 cm) et l'isohyète et entre le taux d'azote et le pourcentage de carbone du sol.

- Région du Gourma (isohyète 180-440 mm)
- Région du parc national de Baoulé (isohyète 540-850 mm)
- + Trajet nord-sud (isohyète 440-580 mm)
- × Champs d'expérimentation Niono (isohyète 580 mm)

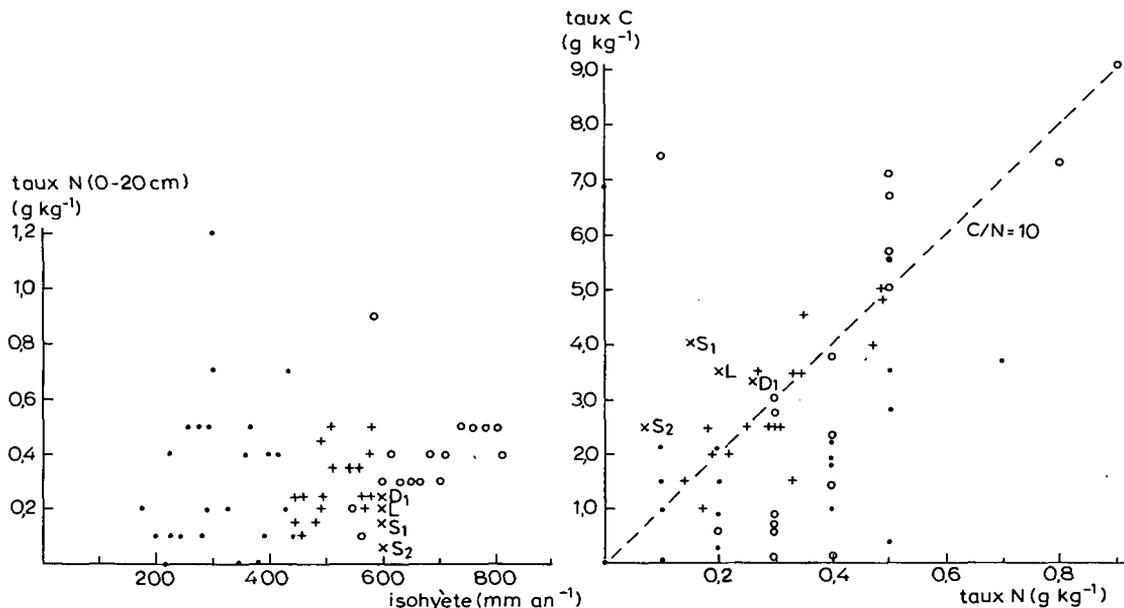


Fig. 3.3.4. The relation between the nitrogen content in the soil (0-20 cm) and the isohyets and between the nitrogen and the carbon content in the soil.

- Region of Gourma (isohyets 180-440 mm)
- Region of the national park of Baoulé (isohyets 540-850 mm)
- + North-South traject (isohyets 440-580)
- × Experimental fields of Niono (isohyets 580 mm)

nique. Ces chiffres indiquent qu'en moyenne ce rapport C/N est près de ou légèrement au-dessous de 10, mais qu'il y a une grande variation.

Le pH des sols est en général neutre et varie un peu entre légèrement basique sur le sable et acide sur l'argile. Seulement sur l'argile le pH peut être tel qu'il limite la croissance des racines. La grande différence entre pH-eau et pH-KCl, qui indique la présence de polymères de Al/Fe dans le complexe absorbant du sol, est remarquable.

Le phosphore (P) total varie entre 40 mg kg⁻¹ sur le sable et 120 mg kg⁻¹ sur l'argile. Sous l'action de pâturage la distribution du P du sol devient plus hétérogène (partie 5.2), et les chiffres inférieurs à 120 mg kg⁻¹ dans la fig. 3.3.5 sont certainement des champs d'accumulation. P-assimilable varie entre 7 mg kg⁻¹ (sur le sable) et 2 mg kg⁻¹ (sur l'argile). La fig. 3.3.5 montre le P-total des sols (0-20 cm) en relation avec l'isohyète et en relation avec le taux en argile. Il semble qu'il n'y a pas une relation entre P-total et l'isohyète ce qui compte aussi pour le P-assimilable (P-Bray II). Si une telle relation existait, elle serait probablement complètement masquée par l'augmentation de la hétérogénéité de la distribution de P par le pâturage. Pour la relation P-total - argile on dirait que le P-total est toujours au-dessus d'une valeur

Fig. 3.3.5. La relation entre le taux de phosphore-total du sol (020 cm) et l'isohyète et le taux de phosphore-total et le taux d'argile.

- Région du Gourma (isohyète 180-440 mm)
- o Région du parc national de Baoulé (isohyète 540-850 mm)
- + Trajet nord-sud (isohyète 245-940 mm)
- x Champs d'expérimentation Niono (isohyète 580 mm)

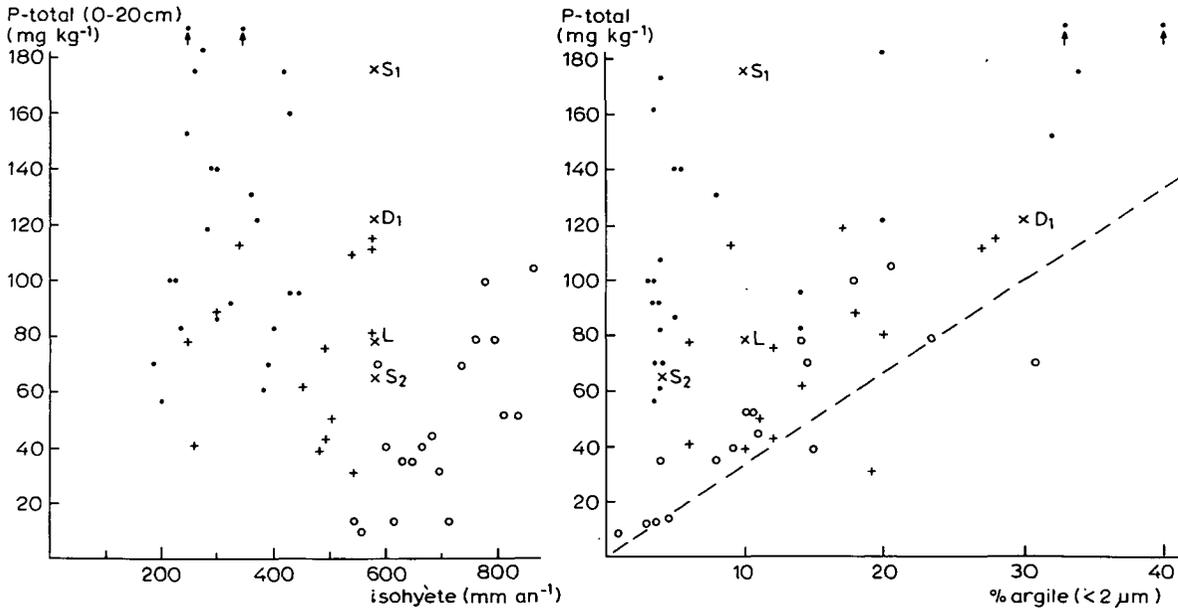


Fig. 3.3.5. The relation between the total soil phosphorus content (0-20 cm) and the isohyets and the total phosphorus and the clay content.

- Region of Gourma (isohyets 180-440 mm)
- o Region of the national park of Baoulé (isohyets 540-850 mm)
- + North-South trajectory (isohyets 245-940 mm)
- x Experimental fields of Niono (isohyets 580 mm)

minimale liée à la fraction d'argile du sol. Nous avons considéré aussi la relation P-Bray II avec l'argile (nombre limité d'analyses) et on observe une tendance contraire, c'est-à-dire une tendance que le P-Bray II diminue à mesure qu'il y a plus d'argile. Cette dernière tendance confirme l'idée qu'une partie de P-total est liée, à une mauvaise disponibilité, avec la fraction d'argile.

Le taux de saturation en bases varie de 1 sur le sable jusqu'à 0,7 sur l'argile. La capacité d'échange du complexe (CEC) des sols est faible. Le principal minéral d'argile est la kaolinite. L'occupation du complexe avec du potassium, K, est suffisante. En conséquence le K-assimilable est toujours satisfaisant. L'occupation avec du calcium (Ca) et du magnésium (Mg) sont dans le même ordre de grandeur. Le sodium (Na) est souvent presque absent; aussi les plantes sont très pauvres en Na. Parce que le bétail en a besoin, le déficit en Na pose un problème dans sa nourriture (Boudet et Leclerq, 1970). En général les sols sont très pauvres en minéraux. Des sols acides ou salins (basiques) sont rares. Les bergers utilisent ces endroits salins pour une cure salée pour le bétail (Gallais, 1975). Une analyse détaillée de ces endroits par Leprun (1978) indique qu'ils ne sont pas riches en un seul minéral, mais qu'ils ont un taux élevé de plusieurs macro-

et micro-minéraux. Donc, probablement le bétail a besoin de la cure salée à cause d'un manque d'un minéral spécifique, mais la cure lui fournit aussi beaucoup d'autres minéraux.

Quelques caractères physiques des sols sont indiqués au tableau 3.3.2. Concernant la granulométrie, le taux en sable fin est remarquable. La faculté de colmatage et de compactage de la surface du sol n'est indiquée que de manière qualitative, + = grande faculté, - = faculté nulle. Les chiffres pour la capacité d'absorption d'eau et le ruissellement sont expliqués dans la partie 4.4.

La plus importante forme d'érosion présente au Sahel est l'érosion par le ruissellement en nappe. Cela veut dire l'érosion par laquelle chaque année une couche mince (dans l'ordre de 0,1-2 mm) du sol disparaît. Cette terre est transportée par l'eau vers les dépressions ou par le vent tout près ou plus loin. L'action de l'eau aplanit toujours le relief, tandis que l'action du vent peut faire les deux, aplanir et accentuer le relief. Les grains grossiers de sable sont simplement roulés sur la surface du sol et forment des petites dunes (voir parties 6.6 et 8.6). Les particules fines sont emportées plus haut par le vent et peuvent être déposées loin de leur origine. Ce sont surtout les plages nues qui perdent de la terre par l'érosion due au ruissellement en nappe, tandis que des endroits avec une couverture végétale gagnent de la terre. Malgré le fait qu'un pourcentage élevé des terrains sahéliens sont sujets à cette forme d'érosion, cette action n'entrave presque jamais l'utilisation de ces terrains. Nous constatons donc, que l'effet de l'érosion est souvent réduite. Pourtant l'érosion est un des facteurs qui contribuent à la formation des hétérogénéités au Sahel, plages nues qui perdent de la terre et des plages bien couvertes qui en gagnent.

3.3.3 Pédologie du ranch de Niono

L'investigation pédologique du ranch de Niono (partie 3.1) est résumée sur une carte semi-détaillée (fig. 3.3.6) (p. 66-67), dessinée à partir d'une couverture photographique panchromatique de 1975.

Le ranch fait partie de l'ensemble fluvial, proprement dit du Delta fossile du Niger. Un caractère du Delta mort est sa platitude relative avec ses élévations mineures de dunes d'un maximum de 10 m. La région n'alimente pas un réseau de drainage mais toute l'eau écoulée est distribuée localement où l'eau est conduite à une des nombreuses mares.

L'étude détaillée a montré l'existence de 8 unités de sol. La distinction est faite sur la base d'une différence de production primaire actuelle ou potentielle. Sans entrer dans le détail, ces unités peuvent être groupées en 3 complexes qui sont faciles à reconnaître sur le terrain. Ce sont:

Le complexe sablonneux (unités de sol S1, S2 et S3) A l'exception des creux interduinaires, la strate ligneuse, dominée par *Acacia Seyal*, *Sclerocarya birrea* et *Guiera senegalensis*, y est bien ouverte. Pendant la période d'étude, *Schoenefeldia gracilis* dominait la strate herbacée. Ce complexe contient des dunes récentes et prononcées (S1) avec des dépressions entre ces dunes (S3) et des dunes anciennes très aplanies et presque plates (S2). L'angle moyen des pentes est de 3%. La surface du sol est souvent couverte

Tableau 3.3.2. Caractères physiques des sols du Sahel (couche 0-30 cm).

		Ensemble sablonneux	Ensemble détritique sur grès ou latérite		Ensemble fluviatile ou lacustre					
			S(L)	Sahel	savane	fossile				Delta actuel
				LS	LS*	LS	IAS	LA	A	A*
Argile <2 µm	(%)	9	16	12	10	25	35	57	54	
Limon 2-50 µm	(%)	6	11	35	15	20	25	25	36	
Sable fin 50-200 µm	(%)	58	50	40	65	35	30	7	5	
Sable grossier >200 µm	(%)	27	25	11	10	20	10	10	5	
Densité apparente	(kg m ⁻³)	1.500			1.500	1.500	1.500	1.450	1.640	
Fraction de volume d'eau pF 1,0	(m ³ m ⁻³)	0,30			0,40		0,37		0,37	
pF 2		0,15			0,25		0,26		0,35	
pF 2,5		0,10			0,13		0,24		0,33	
pF 3		0,04			0,06		0,22		0,32	
pF 4,2		0,02			0,03		0,15		0,26	
Colmatage		-	+	+	+	+	-	-	-	
Compactage		-	+	+	+	+	+	+	+	
Conductivité d'eau (en cas de saturation du sol)	(mm h ⁻¹)	>200			150	15	15	10	10	
Capacité d'absorption d'eau	(mm min ^{-1/2})	5	0,5	0,5	1,0	0,75	0,5	0,5	0,5	
Ruissellement	(%)	0	50	50	30	20	0	0	0	
Porosité (fraction de volume)	(m ³ m ⁻³)	0,43			0,42	0,42	0,42	0,46	0,38	

Table 3.3.2. Physical characteristics of Sahel soils (0-30 cm layer).

*Situés en dehors de la région de recherche. Estimé sur la base de quelques échantillons seulement; situated outside the research area. Estimations based on a few samples only.

d'une croûte d'algues. Cette croûte est responsable d'un ruissellement de 20-40% de la pluie annuelle. Les mares, les dépressions sablonneuses (S3) et les dépressions argileuses profitent de cette eau de ruissellement. Sur la carte (fig. 3.3.6) il n'y a pas de distinction entre S1 et S2 à cause d'une mauvaise reconnaissance sur les photos aériennes.

Le complexe argileux (unités de sol D1, D2 et V) Caractérisé pendant les années d'étude par des populations denses de *Pterocarpus lucens* avec *Pennisetum pedicellatum* à l'ombre et *Diheteropogon hagerupii* et *Loudetia togoensis* dans les clairières. Les grandes dépressions plates sont partiellement couvertes d'une couche de limon (D1) ou même de sable limoneux. Quelques endroits sans couche (D2) avec un taux d'argile élevé ont des caractères vertiques (V). Néanmoins le niveau de la nappe dans toute la région est de 50 m environ. Les sols argileux ont des caractères hydromorphes avec des taches d'oxydation et de réduction à la surface. Ces sols sont très humides pendant 1-2 mois par an. Souvent l'eau y stagne à cause de la perméabilité très faible du sous-sol et une précipitation considérable dans quelques mois. Sur l'unité D1 on trouve des termitières élevées qui forment des plages nues sur 25% de la superficie avec un ruissellement de 50%. Il en résulte que les plages couvertes d'herbes reçoivent plus d'eau que par la pluviosité seulement. Il y a aussi des endroits qui reçoivent encore beaucoup plus d'eau par l'écoulement des complexes sablonneux et limoneux adjacents.

Le complexe limoneux (unités de sol L et W) La végétation se présente comme une mosaïque de fourrés de *Pterocarpus lucens* et des ermes à *Acacia Seyal* et *Sclerocarya birrea*. La strate herbacée était très variée au cours de l'étude, après la disparition d'*Andropogon Gayanus* qui dominait avant la sécheresse: *Borreria chaetocephala*, *Borreria stachydea* et *Blepharis linariifolia* étaient observés plus fréquemment. Ce complexe forme la transition entre les dunes (déposées sur une plaine argileuse comme base) et les dépressions argileuses. Souvent il existe une pente légère vers les dépressions avec un sous-sol argileux compact et un sol limono-sableux à la surface. Ces sols sont couverts d'algues et sont très sensibles à la dégradation physique de la structure du sol. Souvent il y a un ruissellement très varié et très local, c'est-à-dire que l'eau d'une surface limitée (par exemple 10 m²) écoule vers une petite dépression se situant quelques mètres plus loin. Cela explique la grande variation de la végétation de ce complexe. Si le ruissellement n'est que local, mais plus étendu, il y a un grand risque qu'une dégradation physique du sol résulte dans un sol compact et nu pour toujours. Un exemple au ranch de Niono se trouve près d'un point d'eau permanent au sud et est indiqué avec TD (Terrain dégradé) sur la carte, fig. 3.3.6. Ces terrains forment souvent des bassins versants de la plupart des mares.

Tous ces sols sont profonds: plus de 2 mètres. Ce qui veut dire que la capacité de rétention d'eau du profil est grande. Les sols argileux sont tellement humides pendant la saison de pluie que le piétinement du bétail cause un grand dommage au sol. En plus les conditions hydromorphes sont mauvaises pour la fertilité du sol et sont aussi des conditions défavorables pour le développement des racines. Dans tous les sols il existe une activité intense des termites, probablement parce que les conditions comme le taux de limon sont favorables. Le tableau 3.3.3 présente l'information chimique et physique des

Tableau 3.3.3. Caractères physiques et chimiques des sols du ranch à des profondeurs différentes.

Unité de sol (suivant carte Stroosnijder et al., 1977)	Sable S1 <i>(limons sableux)</i>					Sable S2 <i>(limons sableux)</i>			Argile D1					Limon L				
Classification:	Ultic Haplustalf					Udic Ustochrepts			Aeric Haplaquept					Ustalfic Ustochrept				
Soil survey staff (1975)	Eutric Nitosol					Chromic Cambisol			Gleyic Cambisol					Chromic Cambisol				
FAO-Unesco (1977)	Sols fersiallitiques					Sols ferrugineux			Sols hydromorphes minéraux					Sol ferrugineux				
Aubert et Duchaufour (1956)	Séno					Séno			Moursi					Danga				
Nom local	Séno					Séno			Moursi					Danga				
Profondeur	croûte	0-10	30	80	150	350	5-15	60	150	0-1	0-5	10-15	40	130	5-15	40	60	100
Argile <2 µm	-	5,9	12,7	8,7	10,0	-	3,7	8,3	9,5	18,7	20,4	41,2	40,8	37,3	9,8	23,2	23,0	35,8
Limon fin 2-16 µm	-	0,8	1,0	2,5	1,0	-	0,8	1,8	1,2	9,3	8,2	4,5	4,0	5,1	3,3	3,5	4,2	3,7
Limon grossier 16-50 µm	-	19,4	17,5	13,0	13,3	-	13,8	15,6	13,7	29,5	31,5	24,5	24,5	26,8	26,8	26,0	24,5	22,5
Sable très fin 50-105 µm	-	60,6	56,1	64,2	65,4	-	29,2	27,7	27,8	20,1	20,4	13,7	14,9	14,0	24,9	15,9	16,8	14,0
Sable fin 105-200 µm	-	13,8	12,7	11,6	10,3	-	52,5	46,6	47,8	7,3	19,5	16,1	15,8	16,8	35,2	31,4	31,5	24,0
Sable grossier >200 µm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,9	L	A	A	La	Ls	L	L	La
Classification texturale*	-	Ls	Ls	S1	Ls	-	S1	S1	Ls	L	L	A	A	La	Ls	L	L	La
pH-eau	6,3	6,1	5,5	5,8	5,4	8,8	6,1	5,5	5,4	-	5,7	5,8	6,1	6,4	5,8	5,8	5,8	6,0
pH-KCl	5,9	5,3	4,0	4,0	4,4	7,4	5,1	4,1	4,2	-	4,2	3,9	3,9	4,1	4,3	3,9	3,8	3,9
Carbone (C) (g kg ⁻¹)	-	5,6	2,6	1,9	1,6	1,4	2,5	1,9	1,2	-	3,9	2,8	1,3	1,5	3,5	4,0	0,6	1,0
Azote (N) (g kg ⁻¹)	-	0,17	0,10	0,03	0,03	0,32	0,07	0,04	0,04	-	0,29	0,24	0,11	0,06	0,21	0,13	0,10	0,11
Rapport de masse C/N	-	33	26	63	53	4	36	48	30	-	13	12	12	25	17	31	6	9
P-total (mg kg ⁻¹)	-	135	218	201	223	100	65	87	96	-	127	118	100	83	79	92	87	92
P-Bray I (mg kg ⁻¹)	-	7	6	17	24	2	3	1	1	-	3	1	0	1	1	1	1	0
K-assimilable (mg kg ⁻¹)	-	78	105	78	78	-	43	20	31	-	148	94	109	121	47	51	62	94
CEC du sol (pH = 7) (mēq kg ⁻¹)	-	23	36	31	33	31	11	18	20	-	60	109	122	130	136	106	107	119
Rapport Na/CEC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rapport K/CEC	-	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,10	0,03	0,04	-	0,06	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
Rapport Ca/CEC	-	0,66	0,29	0,29	0,35	0,67	0,61	0,35	0,21	-	0,46	0,38	0,48	0,61	0,54	0,43	0,47	0,65
Rapport Mg/CEC	-	0,26	0,26	0,24	0,15	0,30	0,27	0,23	0,28	-	0,31	0,35	0,31	0,25	0,23	0,26	0,24	0,17
Saturation en bases	-	1,00	0,63	0,60	0,56	1,03	0,98	0,61	0,53	-	0,83	0,75	0,81	0,88	0,80	0,71	0,73	0,84
EC (1:5) à 25 °C (mS m ⁻¹)	-	3	0,3	3	3	6	2	3	3	-	3	3	3	3	3	3	7	3
Densité apparente (kg m ⁻³)	-	1.480	1.380	1.350	-	-	1.580	1.530	-	-	1.440	1.270	1.560	-	1.550	1.650	-	-

Table 3.3.3. Physical and chemical characteristics of the soils at the Niono ranch at different depths.

*S1 = Sable limoneux, Ls = Limon sableux, L = Limon, La = Limon argileux, A = Argile; S1 = loamy sand, Ls = sandy loam, L = loam, La = clayey loam, A = clay.

4 unités du sol les plus importantes. La plupart des expériences du projet P.P.S. ont été exécutées sur ces 4 sols.

Texture, classification Pour des raisons de convenance, ces 4 sols sont nommés dans ce rapport sable (S1 ou S2), argile (D1) et limon (L). Sur la base de la classification texturale le sol S1 se trouve en réalité plutôt entre le sable limoneux et le limon sablonneux. Tous ces sols ont un taux élevé de limon grossier et de sable très fin ce qui prouve leur origine éolienne. Très remarquable est le taux différent de sable très fin entre S1 et S2, ce qui illustre bien une différence d'origine. Le sol S2 est un vrai sable limoneux homogène de la surface à la profondeur; par contre l'argile a une couche superficielle qui est limoneuse tandis que le sous-sol est argileux. Le limon a une partie superficielle semblable à celle de S1 mais au sous-sol il est surtout limoneux. Le problème des 2 couches rend la cartographie compliquée. Il y a des facteurs du milieu qui sont presque uniquement déterminés par la surface du sol par exemple le ruissellement mais d'autres cas existent où le sous-sol est primordial, par exemple pour les arbres et pour l'aération du sous-sol. Le sol D1 est un bon exemple de 2 couches avec une origine différente. La couche limoneuse (d'origine éolienne) est déposée plus tard que le sous-sol (d'origine fluviatile). Souvent on y trouve encore en profondeur un horizon fossile de la surface, remarquable par sa couleur noire. Dans les autres cas il y a un transport vertical d'argile de la couche superficielle vers la profondeur par exemple sur S1. Donc la couche superficielle devient plus sablonneuse qu'en profondeur. La croûte (quelques mm) par contre est souvent plus limoneuse que le sol qu'elle recouvre. Toutes ces différences sont d'une grande importance pour les caractères physiques des sols.

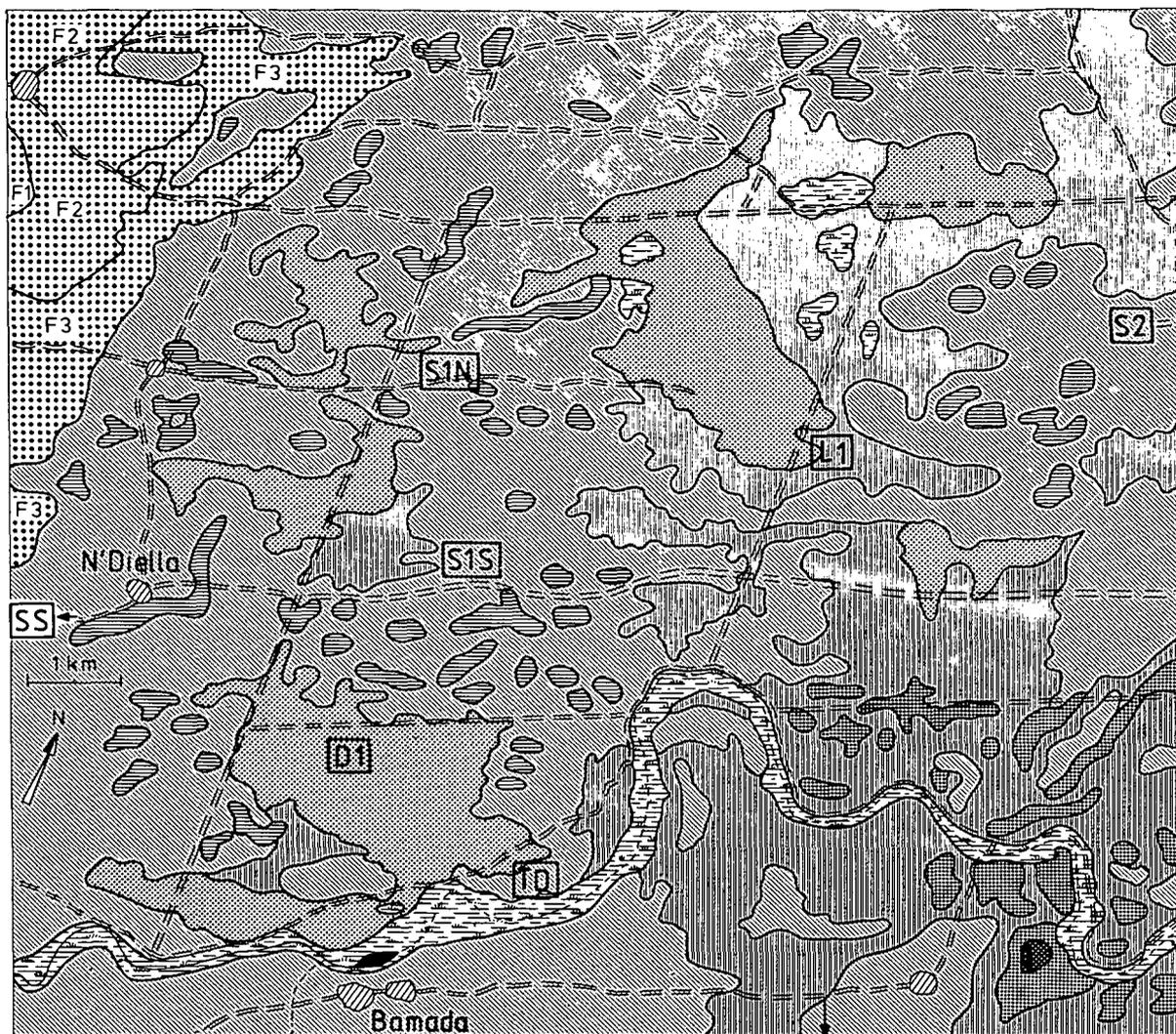
Ayant analysé les minéraux argileux, nous avons trouvé que la kaolinite (0,7 nm) est dominante avec une quantité constante mais très petite d'illite (1,0 nm) et aussi avec un peu des minéraux amorphes du groupe des smectites (1,4 nm).

La classification pédologique est faite par une description détaillée des profils (Stroosnijder, 1982a) et est indiquée aussi au tableau 3.3.3 selon 4 systèmes connus.

pH Tous les sols sont neutres ou légèrement acides. La croûte qui recouvre la plupart des sols a un pH plus élevé. Souvent il existe une grande différence entre pH-eau et pH-KCl. Cette différence ne se trouve presque jamais dans les régions tempérées mais plus souvent dans les régions semi-arides. Ceci est causé par la présence des polymères de Al et Fe au complexe absorbant ayant une manière de dissociation qui est variable avec le pH. Dans le sous-sol de l'argile et du limon le pH-KCl est très bas et ici le développement des racines est perturbé (Sluijs et Houben, 1978).

Carbone-Azote Le taux de C (méthode Kirmies) est bas dans tous les sols. Ce taux est beaucoup plus bas que ne l'a rapporté Feau (1976) pour des sols au Niger et plus bas aussi qu'indiqué dans des livres standards comme Ahn (1970) et Jones et Wild (1975). Le taux de N est aussi très bas. Chose curieuse, le rapport C/N est très élevé sur le sable ce qui n'est pas souvent le cas pour les sols au Sahel. Probablement un tel rapport élevé est dû à la protection du ranch contre l'exploitation depuis 1960.

CARTE PÉDOLOGIQUE SEMI-DÉTAILLÉE D'UN RANCH



Sols des dunes

S1 sols des dunes
S2 sols des dunes érodées

S3 sols des dépressions

Sols argileux des dépressions

D1 sols argileux

D2 sols argileux et vertiques

Mil

L sols limoneux de

V. vertisols

W sols des drains

L. Stroosnijder, S. Diarra et P. Buringh
Cartographie: P. G. M. Versteeg

Projet: Production Primaire au Sahel. B.P. 1704, Bamako, Rép. du Mali
De Dreyen 2, Wageningen, Pays - Bas 1977

ÉLIEN: NIONO, RÉPUBLIQUE DU MALI



Fig. 3.3.6.
Carte pédologique semi-détaillée d'un ranch sahélien: Niono, Rép. du Mali.
Les champs d'expérimentation sont indiqués:
SIN, SIS sable type S1 (fin)
S2 sable type S2 (grossier)
L1 limon
D1 limon-argileux-argile
TD terrains dégradés
SS Station du Sahel, Niono à 10 km.

Fig. 3.3.6.
Semi-detailed pedological map of a Sahel ranch: Niono, Rep. of Mali. The experimental fields are shown:
SIN, SIS sand type S1 (fine)
S2 sand type S2 (coarse)
L1 loam
D1 loam-clayey-clay
TD degraded lands
SS Station du Sahel, Niono, 10 km away.

Sols fluviaux

- | | | |
|---|---|-------------------|
|  | F1 sols irrigués | == piste |
|  | F2 sols non-irrigués | — drain permanent |
|  | F3 sols non-irrigués
avec une couche sableuse | ---- drain sec |
| | | ----- bourtou |
| |  | village |
| | ● | puits |

Phosphore-Potassium Le taux de P est bas en P-total et aussi en P-assimilable selon la méthode Bray II. L'interprétation et l'importance de ces chiffres sont données dans la partie 5.4. Le taux de K est souvent suffisant, surtout au niveau de la production actuelle. Sur S2 il y a le risque d'un manque (voir partie 5.1).

Capacité d'échange et occupation par les bases La capacité d'échange d'argile du sol (CEC) est comprise entre 200 et 300 méq kg⁻¹. Ce taux bas est la conséquence de la dominance de la kaolinite dans les minéraux argileux. Le taux de saturation du complexe absorbant avec K est suffisant, celui de Mg est grand. Le Na ne pouvait pas être déterminé avec la méthode utilisée, mais Boudet et Leclerq (1970) ont trouvé des chiffres extrêmement bas. La saturation en bases est toujours plus que 0,5 et proche de 1 à la surface. Les sols les plus secs ont un pH et un taux de saturation élevés, ces 2 facteurs étant étroitement liés.

Les caractères physiques des sols sont importants à considérer par suite de leur influence sur le bilan d'eau par exemple, mais aussi parce que l'origine de la dégradation du milieu sahélien est liée aux conditions physiques des sols (voir partie 6.6). La partie la plus importante du sol est sa surface, c'est là où l'eau s'infiltré d'abord et s'évapore après.

La croûte Il y a 2 raisons pour la présence d'une croûte. La première raison est la présence d'algues à la surface de beaucoup des sols et on y observe facilement des hyphes à l'aide d'une loupe binoculaire. La présence d'algues est liée à la texture des sols. Les sols du Delta fossile du Niger avec leur taux élevé de limon et de sable très fin semblent être un milieu idéal pour les algues. Ces algues produisent un lacis de fibrilles qui relient les particules du sol. Le résultat en est qu'il y a une croûte de surface qui n'est pas seulement une résistance purement physique à l'infiltration de l'eau mais qui est aussi hydrophobe. Cette répulsion pour l'eau s'explique par les produits de détérioration des algues et des filaments morts. L'hydrophobie des croûtes des sols à Niono a été étudiée en détail par Rietveld (1978). La simulation du mouvement de l'eau à travers cette croûte a montré que l'infiltration est retardée au début d'une pluie (Rietveld et al., 1982). Après 5-10 minutes l'effet d'hydrophobie est disparu. Cependant la vitesse d'infiltration est encore basse, ce qui est causée par le colmatage physique de la surface, deuxième cause de la formation d'une croûte. Ce colmatage se produit surtout sous l'influence des pluies battantes avec une grande intensité (voir partie 3.2). L'énergie cinétique suffit pour séparer les grains individuels à la surface. Ici la cohésion des grains sous forme d'agrégats est déjà beaucoup réduite par une température extrême (plus de 60 °C) et un taux de matière organique très bas. En conséquence de cette séparation, les particules d'argile et de limon forment une suspension et sont en partie entraînées dans le sol par l'eau qui s'infiltré. Les grains de sable restent nus et isolés à la surface. Après, ces grains sont transportés par le vent et il se forme de petites dunes ailleurs. Par ce processus de séparation, la croûte contient beaucoup d'argile et de limon et devient ainsi compacte et imperméable. En combinaison avec les filaments des algues cette croûte est résistante à l'érosion éolienne et à l'érosion hydrique. Il y a des indications (Dulieu et al., 1977) que l'existence des

algues augmente à mesure que la biomasse des herbacées diminue. En effet, on montrera dans la partie 6.6 que les algues et la croûte en général contribuent beaucoup à la dégradation du Sahel.

Compacité La compacité du sol est fonction de sa texture, de l'activité biogène et des forces externes sur le sol. Si un sol a une texture hétérogène, cela veut dire qu'il y a un bon assortiment de grains avec des dimensions différentes, la compacité peut être grande. Si l'assortiment est moindre, le risque de compacité est moindre. A la fig. 3.3.7 les couches supérieures des sols du ranch sont présentées de manière que les échantillons qui forment une ligne droite aient une plus grande chance de se condenser. Au ranch ce sont les sols limoneux.

Le compactage peut se faire même sans forces externes (autocompactage) mais elle a lieu aussi sous le piétinement de bétail, quant aux sols limoneux et argileux surtout pendant l'hivernage. Les facteurs contrariant le compactage sont la croissance des herbes qui fendillent le sol avec leurs racines, et l'activité des animaux dans le sol comme les termites et les fourmis qui le remuent. Ces animaux consomment de la paille qui reste souvent sur le sol pendant toute la saison sèche. Ces insectes créent des macropores dans le sol qui pénètrent et cassent la croûte. Donc la végétation et l'activité animale sont importantes à maintenir un milieu du sol assez poreux pour qu'une croissance puisse s'y faire. Dans le cas où la biomasse de la végétation diminue à cause des conditions climatiques ou humaines cela influence le milieu de telle manière que le développement d'une végétation y devient de plus en plus difficile. Ce phénomène général joue un rôle très important parce que la matière organique du sol, qui agit souvent comme facteur de stabilisation de la structure du sol, est négligeable au Sahel.

Fig. 3.3.7. Répartition cumulative des fractions de la texture des 3 principaux types de sol (sable, limon, argile); d = diamètre des grains (μm).

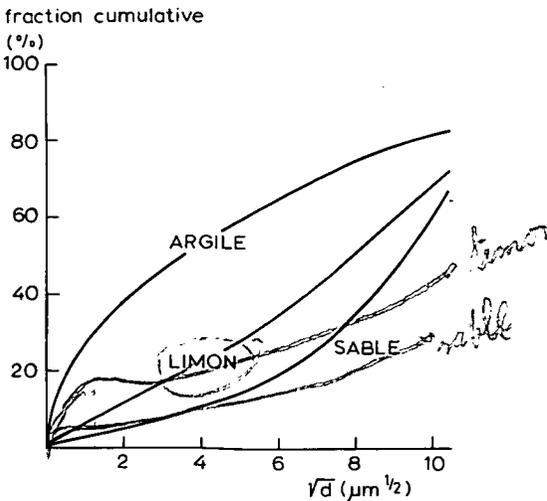


Fig. 3.3.7. Cumulative distribution of the fractions of the texture of 3 main types of soil (sand, loam, clay); d = grain diameter (μm).

Fig. 3.3.8. Courbes de rétention d'eau (pF - θ) et de conductivité du sol non-saturée ($k_s - \theta$) pour les 4 unités principales de sol à Niono; θ est la teneur d'eau du sol en $m^3 m^{-3}$.

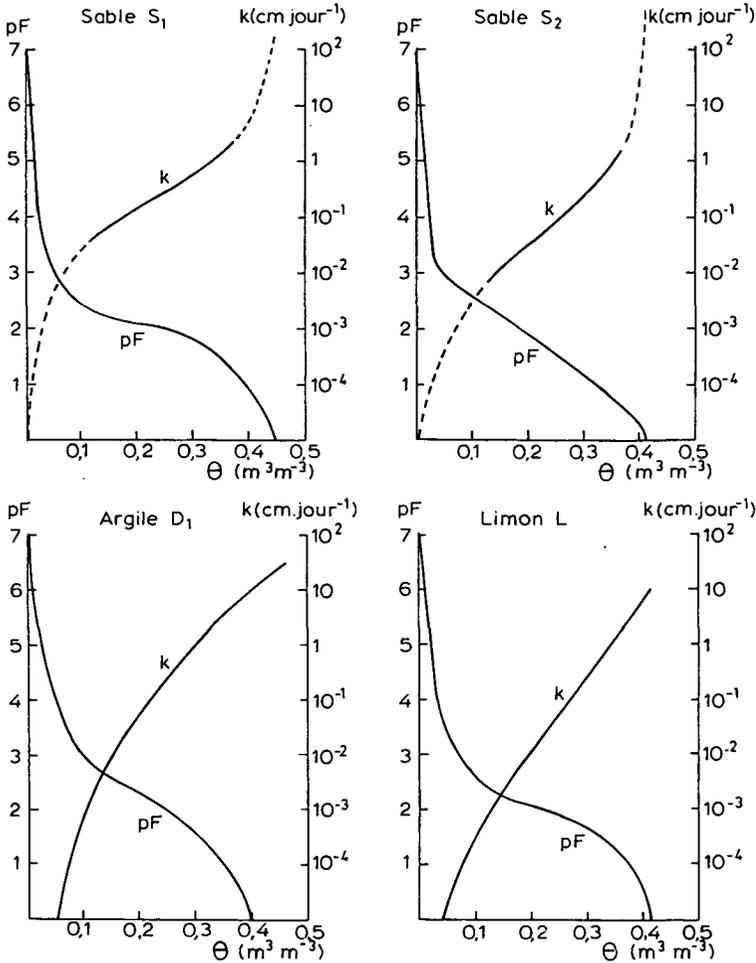


Fig. 3.3.8. Curves of water retention (pF - θ) and of the conductivity of unsaturated soil ($k_s - \theta$) for the 4 main soil units at Niono; θ is the water content of the soil in $m^3 m^{-3}$.

Le tableau 3.3.3 montre que l'unité S1 a une densité apparente moyenne à la surface et qu'elle est très poreuse en profondeur. L'unité S2 est déjà beaucoup plus compacte que S1. L'argile n'est pas très compacte en surface à cause de sa faculté de se dilater quand elle est humide et de se rétracter quand elle devient sèche ce qui provoque des fissures. En profondeur elle est aussi compacte. Le limon quant à lui est toujours très compact.

Capacité d'infiltration (voir sous Croûte, et à la partie 4.4)

Courbes de rétention d'eau et de conductivité d'eau non-saturée La fig. 3.3.8 représente les courbes de rétention d'eau (courbe pF) et de conductivité non-saturée (courbe $k(\theta)$)

Tableau 3.3.4. Capacité au champs (CAC) et point de flétrissement (PDF), exprimés comme fraction de volume d'eau dans le sol.

Sol	CAC $k(\theta) = 10^{-1}$ cm jour ⁻¹ (ml l ⁻¹)	CAC $k(\theta) = 10^{-2}$ cm jour ⁻¹ (ml l ⁻¹)	PDF (ml l ⁻¹)
S1	180	75	25
S2	250	145	25
D1	225	150	50
L	265	195	30

Table 3.3.4. Field capacity (CAC) and wilting point (PDF), expressed as volume fraction of water in soil.

des 4 unités de sol principales. La courbe pF est la courbe de dessèchement et la courbe $k(\theta)$ est déterminée par une méthode utilisant le dessèchement par l'air chaud (Arya et al., 1975). Les courbes ne sont que valables pour la couche 0-5 cm. Elles étaient déterminées afin de pouvoir calculer, sur base de la théorie, l'évaporation du sol. On note que les courbes des 4 unités de sol ne diffèrent pas beaucoup pour les 4 sols. Cela est dû au fait que tous les sols sont couverts avec le même dépôt éolien de sable limoneux. En profondeur les différences entre les courbes sont plus grandes.

Sur base de ces courbes on peut définir la capacité au champs (CAC) de 2 manières. Premièrement on mesure l'humidité du sol après 1 jour de redistribution d'eau d'une humidification. Deuxièmement on mesure l'humidité après une redistribution complète. L'expérience indique que la première correspond à l'humidité où $k(\theta) = 10^{-1}$ cm jour⁻¹ et la deuxième à un $k(\theta) = 10^{-2}$ cm jour⁻¹. Le point de flétrissure reste toujours défini comme humidité au pF = 4,2. Les chiffres pour les 4 unités de sol principales sont résumés au tableau 3.3.4. On note que surtout les sols sablonneux ont une possibilité de redistribuer encore une quantité d'eau considérable pendant une redistribution prolongée. Ceci indique, surtout à S1, que les sols peuvent s'humidifier jusqu'en profondeur avec un peu d'eau seulement.

3.4 LA PHYTOECOLOGIE DU SAHEL ET DU TERRAIN D'ETUDE

3.4.1 Introduction

Le Sahel est la zone de transition entre le désert du Sahara et le monde tropical. Il est généralement défini comme l'une des zones climatiques et zones de végétation qui se succèdent en Afrique occidentale, de l'équateur au Sahara. La carte de la fig. 3.4.1 représentant l'Afrique occidentale montre ces différentes zones. La carte de la fig. 3.4.2 plus détaillée, indique pour le Mali, la subdivision en zones de végétation.

Le Sahel est une région caractérisée par un climat particulier et une végétation spéciale. Du point de vue climatique, on distingue 2 saisons, une saison humide courte et une saison sèche prolongée. Cette alternance de 2 saisons aux caractères fortement opposés conditionne toute la vie au Sahel. La pluviométrie y est faible et très variable d'une année à l'autre. La disponibilité de l'eau pour la croissance des végétaux est fortement influencée par la nature du substrat et par la topographie. L'aridité du