

**TRAVAUX  
ET DOCUMENTS  
DE L'O.R.S.T.O.M**

**LES GRANDS TRAITES DE LA PÉDOGENÈSE  
AU NIGER MÉRIDIONAL**



**Michel GAVAUD**



**ÉDITIONS DE L'OFFICE  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER**

**RENSEIGNEMENTS, CONDITIONS DE VENTE**

Pour tout renseignement, abonnement aux revues périodiques, achat d'ouvrages et de cartes, ou demande de catalogue, s'adresser au :

SERVICE DES PUBLICATIONS DE L'ORSTOM  
70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY (France)

- Tout paiement sera effectué par chèque bancaire barré au nom de RÉGIE ORSTOM BONDY, ou par chèque postal (compte n° 9.152-54, Paris, RÉGIE ORSTOM BONDY).
- Achat au comptant possible à la bibliothèque de l'ORSTOM, 24, rue Bayard, 75008 PARIS.

**I - CAHIERS ORSTOM**

BIOLOGIE  
ENTOMOLOGIE MÉDICALE ET PARASITOLOGIE  
HYDROBIOLOGIE  
HYDROLOGIE

Océanographie  
Pédologie  
Sciences Humaines

<i>séries trimestrielles</i>	Abonnement :	France 120 F.	36,30 US dollars
		Etranger 156 F.	
GÉOLOGIE - <i>série semestrielle</i>	Abonnement :	France 96 F.	28,00 US dollars
		Etranger 120 F.	

**II - BULLETIN ANALYTIQUE D'ENTOMOLOGIE MÉDICALE ET VÉTÉRINAIRE**

12 numéros par an (15 fascicules)	Abonnement :	France 115 F.	30,25 US dollars
		Etranger 130 F.	

*Dans la collection des MÉMOIRES de l'ORSTOM :*

TURENNE J.-F. — Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises, n° 84. Paris, ORSTOM, 1977, 170 p., 45 fig., 1 pl. fotogr. coul.

VIELLEFON J. — Les sols des mangroves et des tannes de basse Casamance (Sénégal). Importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogenèse, n° 83. Paris, ORSTOM, 1977, 292 p., 101 fig., 1 carte coul. h.-t.

## **ERRATUM**

**Page 29: lire FIG. 4 au lieu de FIG. 3**

**Page 68: lire FIG. 5 au lieu de FIG. 4**

TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'O.R.S.T.O.M.

N° 76

***LES GRANDS TRAITES DE LA PÉDOGENÈSE  
AU NIGER MÉRIDIONAL***

**M. GAVAUD**

*pédologue de l'O.R.S.T.O.M.*

**O. R. S. T. O. M.**

**PARIS**

**1977**

---

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal ».

---

© O.R.S.T.O.M. 1977

I.S.B.N. : 2-7099-0461-6

## RÉSUMÉ

*Les sols observés au cours d'un inventaire cartographique à petite échelle du Niger méridional sont présentés par Associations. Chacune est définie par une combinaison spécifique de processus pédogénétiques s'étendant à un paysage caractéristique dans sa topographie, ses éléments biocénétiques et ses matériaux. Les Associations sont présentées dans un ordre d'évolution décroissante qui pourrait être celui de leurs apparitions successives au cours du Quaternaire. Dans cette hypothèse leur histoire serait une suite de périodes pédogénétiques découpées par des pseudo-cycles climatiques dans une tendance constante vers l'aridité.*

*Sur un acquis pré-Quaternaire formé de matériaux kaoliniques scellés par un cuirassement généralisé à trame ferrallitique la première période a produit des sols ferrugineux indurés dont les restes se répartissent en modelés étagés. L'agressivité climatique réduite de la seconde période a diversifié les sols en fonction des roches-mères. Des séquences à sols ferrugineux et à sols hydromorphes lessivés se sont formées sur des matériaux kaoliniques ou illitiques hérités, des séquences à sols halomorphes et à sols lessivés sur roches plagioclastiques, des séquences à sols eutrophes et à vertisols sur des roches basiques. Cette période prend fin par deux invasions dunaires qui fourniront le matériel de deux générations de sols ferrugineux peu lessivés. La troisième période réduit la pédogenèse à des processus d'expression rapide, l'hydromorphie et l'halomorphie, ainsi qu'à la dégradation superficielle des sols anciens en milieu subaride.*

## SUMMARY

*Southern Niger soils observed during a small scale pedological survey are described into Associations. Every one is defined by a specific combination of soil forming process extending to a characteristic landscape with peculiar materials, topography and biocenotic elements. Soils Associations are presented according to a decreasing degree of evolution which could be the same as their formation order during the Quaternary. Following this hypothesis their history may be a sequence of pedogenetic periods produced by pluviometric pseudo-cycles during a continuous trend towards aridity.*

*The pre-Quaternary inheritance consists of a generalized iron-pan with ferrallitic-like framework sealing kaolinic materials. The first pedogenetic period produced indurated ferruginous soils which remnants form stepped landscapes. The soils of the second periods are diversified according to parent rocks owing to a reduced weathering. Sequences with ferruginous and leached hydromorphic soils on inherited kaolinic or illitic materials, sequences with halomorphic and leached soils on plagioclastic rocks, sequences with vertisols and eutrophic soils on basic rocks are formed. This period ends with two sand-hills invasions which will provide the material of weakly leached ferruginous soils. The third period restricts to rapid transformations as hydromorphic and halomorphic process besides the ancient soils superficial degradation in subarid conditions.*

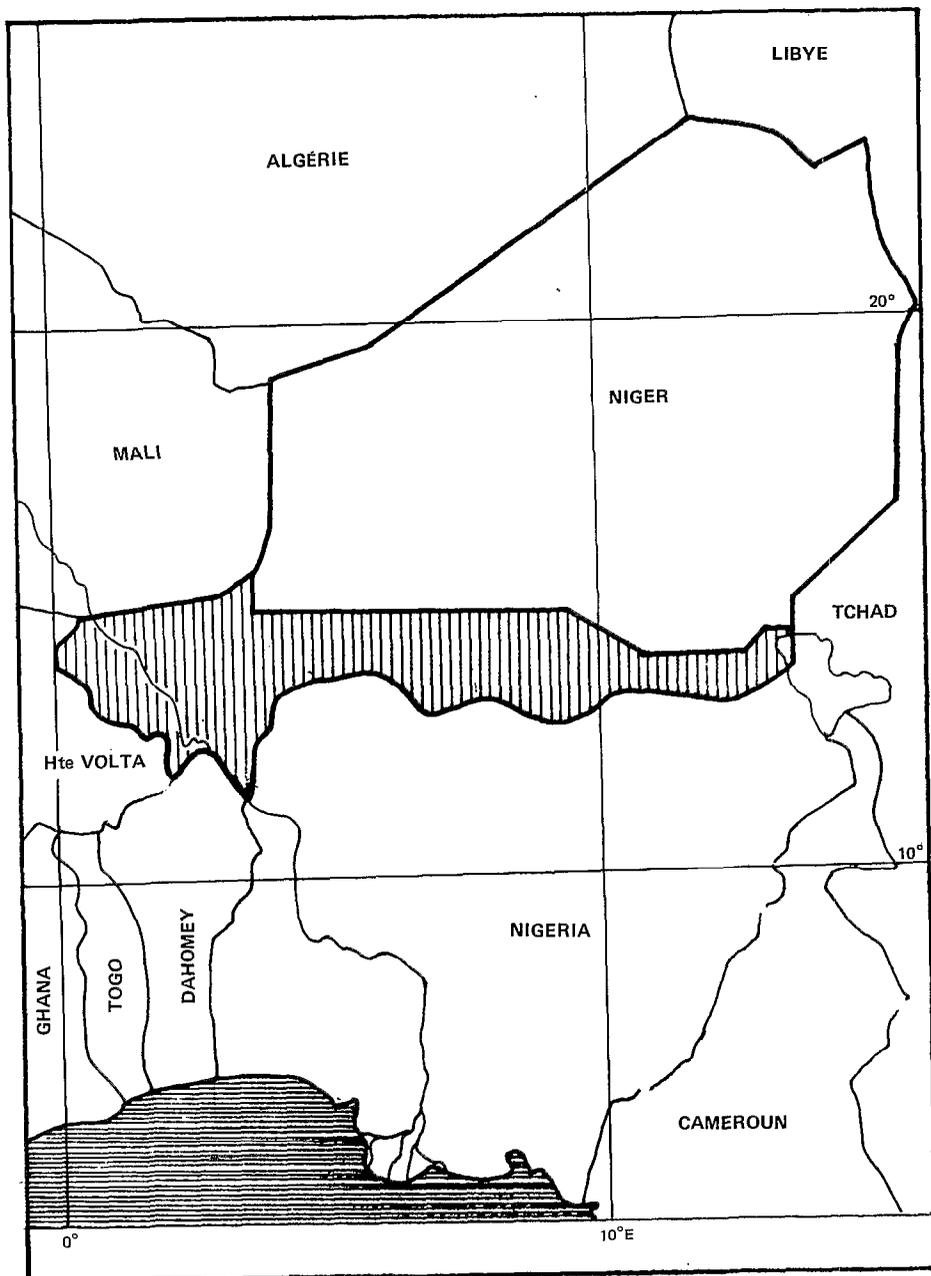


FIG. 1. — Carte de localisation

## PRÉSENTATION

Les données résumées dans cet article ont été recueillies lors d'une cartographie à l'échelle du 500 000 des sols du Niger méridional<sup>1</sup>. Elles sont généralement d'ordre typologique et géographique du fait de leur origine, des méthodes de prospection extensives employées, de caractères saillants de la répartition des sols du Niger.

L'unité d'exposition la plus commode est un paysage cartographiable à petite échelle dont les formes sont couvertes de la même succession de sols ou de successions apparentées. On peut y définir un élément topographique de base et lui faire correspondre une combinaison particulière de processus et de mécanismes pédogénétiques. Au Niger de tels ensembles se succèdent dans l'espace dans un ordre bien déterminé, sans doute parce qu'il en fut ainsi de même dans le temps, avec des modèles spécifiques et des limites bien tranchées. Au sein de chacun d'eux les substrats sont minéralogiquement apparentés, la végétation et l'utilisation des sols sont caractéristiques. Un type pédologique y est spécialement développé, sinon dominant, son apparition dans le temps paraissant liée à celle du paysage topographique. En décrivant successivement chacune de ces unités autonomes on parcourt à la fois les petites régions les plus caractéristiques du Niger, les étapes les plus importantes de son histoire, finalement les chapitres essentiels de la Classification des sols de sa zone climatique.

---

1. Cette étude est en fait un résumé de l'ouvrage du même auteur intitulé « Sols et pédogenèse au Niger méridional » qui paraîtra prochainement aux Editions de l'O.R.S.T.O.M. sous forme de microfiches.

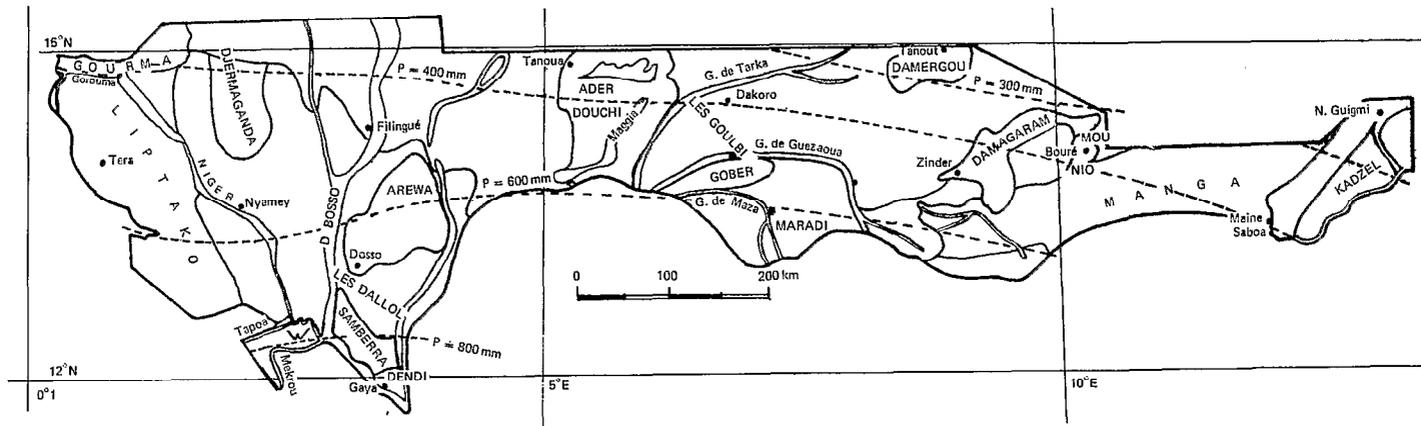


FIG. 2. — Régions naturelles du Niger Méridional

## LE MILIEU NATUREL

### *Situation géographique*

Le Niger méridional forme une bande de 255 000 km<sup>2</sup> très étirée en longitude de 0° 30' E à 13° E mais plus resserrée en latitude de 12° N (isohyète de 850 mm) à 15° N (isohyète de 350 mm). D'ouest en est il s'organise en trois bassins :

— *Le Niger Occidental* ou *bassin du Moyen Niger* (J. GREIGERT, 1954), sur grès du Continental Terminal. Il est limité à l'ouest par un versant sur le socle Pré et Infra-Cambrien, à l'est par la cuesta du sidérolithique de l'Ader Douchi.

— *Le Niger central* ou *bassin des Goulbi*, sortes de vallées sèches décrites par Y. URVOY (1942), établi sur le Crétacé continental et marin.

— *Le Niger oriental* ou *bassin de la cuvette tchadienne* séparé du précédent par une série de petits massifs de collines gréseuses et cristallines.

Du nord au sud il est traversé par trois zones climatiques successives ayant chacune un contenu pédologique distinct :

— *Le Sahel*, à moins de 350 ou 450 mm de pluies. Le paysage est formé de glacis mous, fortement ensablés, à reliefs résiduels peu nombreux. Il est couvert de steppes d'épineux ou d'herbes, pâturés, parfois cultivés en millets. La couverture est constituée de sols ou de faciès subarides, la plupart dunaires, quelques-uns autochtones et alors diversement argileux.

— *La zone soudanienne nord*, jusqu'à 750 ou 800 mm de pluies. Les glacis sont très souvent dominés des restes tabulaires étagés de vieux modelés cuirassés. De larges fenêtres s'ouvrent dans les ensablements dunaires. Des savanes, arborées ou boisées, ont été créées par la culture extensive du millet, du sorgho, de l'arachide. Les sols ferrugineux, peu lessivés ou lessivés, dominant.

— *La zone soudanienne sud*, où les glacis fonctionnels sont eux-mêmes concrétionnés, cuirassés ou gravillonnaires. Les dunes ne sont plus représentées que par quelques édifices isolés aux pieds de reliefs. Elle est souvent peu peuplée et des îlots de forêt claire y ont été conservés. Les sols ferrugineux lessivés sont souvent exclusifs. Les premiers sols faiblement ferrallitiques y font leur apparition.

## *Le climat*

### CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Sur toute l'étendue du Niger méridional on observe :

— deux passages zénithaux rapprochés, le 15 mai et le 28 juillet sur le quatorzième parallèle nord.

— une saison des pluies estivale courte, à vents dominants humides de sud-ouest.

— une saison très sèche de 7 à 10 mois à vents continentaux de nord-est (harmattan).

— une insolation très forte, de l'ordre de 3 000 heures par an ; des températures excessives, une hygrométrie moyenne très faible.

— une pluviosité décroissant régulièrement vers le nord-nord-est de 875 mm à la frontière dahoméenne à 250 mm sur la rive nord du lac Tchad.

### LES TEMPÉRATURES

Le cycle annuel des valeurs extrêmes et moyennes passe partout par deux maxima et par deux minima. La période relativement fraîche de décembre à février contraste avec les rigueurs thermiques d'avril-mai. La saison des pluies apporte une faible évaporation qu'efface rapidement la pointe de septembre-octobre. La zone la plus chaude se situe entre les isohyètes 400 mm et 800 mm. Il fait plus frais en hiver au nord, plus frais en été au sud. Ces variations sont de peu d'importance à côté de l'excès thermique général qui porte les moyennes annuelles à 28-29 C.

Le sol superficiel est toujours, à l'échelle du mois, plus chaud que l'air. Il en résulte un flux thermique dirigé vers la surface qui ne peut qu'accroître l'évaporation, cela d'autant plus que le sol est plus sec.

### LES PRÉCIPITATIONS

Les pluies ont partout une répartition annuelle similaire, avec maximum en août, mais diminuent en importance et croissent en concentration, à diverses échelles de temps, vers le nord. Elles sont le fait d'averses à hyétoigrammes et intensités semblables, ces dernières de l'ordre de 60 à 200 mm/h lors du « corps » des tornades, mais plus courtes et moins nombreuses aux hautes latitudes. La variabilité intra-annuelle, fort élevée, croît également de 15 % (écart réduit) sur l'isohyète 800 mm à 40 % sur l'isohyète 200 mm.

Les variations de niveaux lacustres (A. BOUCHARDEAU et R. LEFEVRE, 1957 et H. FAURE, 1965) mettent également en évidence des fluctuations pluviométriques de plus grande amplitude. Les phases sèches (1910-1920, 1941-1946, 1965-1970) sont particulièrement dommageables aux pâturages, aux cultures trop avancées au nord et se traduisent par des crises érosives.

## ETAT HYGROMÉTRIQUE DE L'AIR

La siccité de l'air est un élément climatique majeur : l'humidité relative est inférieure à 50 % pendant 9 mois au nord, 6 mois à Nyamey, 5 mois au sud. En été l'arrivée des masses d'air méridionales crée partout la même humidité (65-80 %) de juillet à septembre. Ensuite l'invasion d'air continental provoque une dessiccation progressive aggravée vers le nord par les très fortes températures d'avril-mai. Le pouvoir évaporant de l'air croît donc de 1 870 mm (Piche) par an au sud à 3 400 mm au nord.

## LES VENTS ET LES PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS

Les vents sont faibles sauf pendant la période de transition entre les deux régimes de sud-ouest et de nord-est de mars à mai. Un renforcement sporadique est alors à l'origine de tornades sèches, de vents de sables ou de poussières. Il existe une situation propice à l'érosion éolienne, de vent fort et de couverture végétale réduite, pendant 10 à 25 jours par an. En fait il n'y a guère que 2 à 10 journées à vents de sables par an, les maxima se situant au nord.

Les brumes sèches sont plus fréquentes dans la zone médiane, entre 400 et 600 mm de pluies, qu'au nord : 20 à 70 jours contre 1 à 13 jours. L'effet dans les sols des chutes de poussière qu'elles provoquent n'a pu être soupçonné que dans la cuvette tchadienne où une poudre de carbonate et sulfate de calcium et magnésium a été recueillie le 18/2/62.

## LES ÉQUILIBRES PLUVIO-THERMIQUES

Faute de mesures in situ il est possible d'accorder quelque crédit aux calculs d'évapotranspiration, les sols sableux qui recouvrent si largement le Niger satisfaisant le mieux aux approximations requises (GAVAUD, 1968, pp. 99-102). Le cycle de l'évapotranspiration potentielle Penmann suit celui du déficit de saturation avec un minimum en août. Le total annuel croît de 1 800 mm à 2 100 mm du sud au nord (F.A.O., 1967). L'évapotranspiration réelle (TURK, 1955 - CHARREAU, 1961) n'est limitée que par la pluviosité ; elle est donc maximum en août et minimum en saison sèche. Le « drainage à deux mètres de profondeur » ne commence qu'après reconstitution des réserves en eau du sol pratiquement annulées par la saison sèche. Il se prolonge pendant une durée qui ne déborde le mois d'août que dans les régions méridionales. En sol nu il s'annule pour 360 mm de pluies. Sous couvert graminéen il passe de 0 à 280 mm lorsque la pluviosité passe de 470 à 875 mm. Il serait toujours nul sous une végétation suffisamment dense, savane boisée ou forêt claire (AUDRY, 1967). La variabilité du drainage est supérieure à celle de la pluviosité. A Say (800 mm) il varie de 1 à 10 alors que la pluviosité varie de 1 à 2,5. A cause de cette dispersion la probabilité pour que les horizons profonds s'humectent dans les régions les plus sèches n'est jamais nulle.

Peu de données concernent les sols plus argileux. CLAVAUD (1967) a montré que les solonetz-solodisés du Guera (Tchad) ne s'humectaient pas à plus de 15 cm de profondeur pour une pluviosité de l'ordre de 600 mm. Il est donc probable que

l'obsolescence bien connue des sols lourds en milieu aride se manifeste déjà au Niger méridional.

#### RUISSELLEMENT ET ÉROSION HYDRIQUE

Les coefficients d'écoulement varient de 3 à 12 % dans de petits bassins de la zone climatique du Niger méridional (Annuaire Hydrologiques ORSTOM), le chiffre de 8 %, correspondant déjà à des sols très érodés, ayant été mesuré dans l'Ader Douchi. L'érosion « spécifique », estimation calculée de l'agressivité climatique à l'échelle des grands bassins (F. FOURNIER, 1958), approche du maximum de l'Afrique de l'ouest : 1 500 à 200 t/km<sup>2</sup>/an, soit 55 à 75 cm de sol par millénaire, ce qui est considérable.

L'état général des sols du Niger, souvent amenuisés et remaniés, est mauvais, ce d'autant plus que le climat est plus sec. En effet la diminution de pluviosité réduit les transports exoréiques qui estiment l'érosion spécifique mais porte au contraire au maximum les brassages et transports à faibles distances dont dépend finalement le degré de conservation des sols (A. SCHUMM et R.F. HADLEY, 1961). Divers facteurs positivement liés à l'aridité concourent à ce résultat : éclaircissement du couvert végétal, impact plus fort des cultures et du surpâturage, héritage de surfaces anciennes d'érosion peu perméables.

#### QUELQUES RELATIONS ENTRE LE CLIMAT ET LES SOLS

##### *La zonalité*

La pluviosité est le facteur climatique déterminant, la température étant uniformément excessive. Aussi peut-on attribuer à son gradient l'étagement latitudinal de la végétation et de caractères pédologiques. Sur la grande famille des sables se succèdent, du nord au sud :

- à moins de 100 mm, limite septentrionale du climat sahélien nord des climatologues, des sols éoliens de dunes vives.
- à moins de 250 mm, limite sud du climat précité, des sols gris subdésertiques à croûte organique issus de la destruction hydrique et éolienne de sols subarides brun-rouge.
- à moins de 350-410 mm, limite approchée méridionale du climat sahélien sud et du bio-climat sahélo-saharien d'AUBREVILLE (1949), les épipédons à faciès subaride brun-rouge.
- à moins de 750-800 mm, limite approchée du climat soudanien nord les sols ferrugineux peu lessivés.
- au-delà des variétés plus sombres et organiques d'épipédons de type ferrugineux sous des formations ligneuses plus denses.

Or si les épipédons sont continûment affectés par cette transformation zonale les horizons B restent pratiquement invariables, bien que la probabilité de ces derniers de participer aux échanges hydriques diminue fortement vers le nord, par exemple de moitié entre Tillabéry (480 mm) et Tahoua (380 mm). Cette disharmonie existe, variablement développée, dans d'autres grandes familles. Elle est forte sur les argiles 2:1 calciques où à moins de 650 mm apparaissent des épipédons de type subaride. Elle est très faible sur les argiles kaoliniques qui conservent le même profil, à très peu

de chose près, entre 300 et 700 mm. Ces observations débouchent sur deux groupes d'hypothèses. On admet que les caractères invariants sont hérités, qu'ils ont d'autant plus de chance d'être inactuels qu'ils sont situés plus profondément, à des latitudes plus élevées, qu'ils appartiennent à des familles moins perméables. On les attribue d'autre part à une pédogenèse plus active, à des paléoclimats plus humides. D'une façon plus générale les anomalies zonales, telles que la situation de sols cuirassés de régions humides en plein Sahel et inversement la présence de dunes fixées en région soudanienne, peuvent recevoir une explication de même nature dans laquelle ont fait alterner des climats plus humides ou secs que de nos jours. L'étude de la répartition en latitude des sols du Niger débouche ainsi sur une reconstitution approchée des tendances climatiques anciennes que nous exposons in fine.

### *L'altération*

L'altération climatique est faible, si l'on admet que cette dernière est celle des modelés juvéniles à front rocheux accessible aux eaux météoriques. Les roches à grain fin, surtout basiques, les grès à ciment ferrugineux ou silicieux ne s'altèrent en aucune façon. Les granites à grain moyen se desquament et par désagrégation granulaire libèrent de petites quantités d'arène. Les grès à ciment argileux sont plus sensibles à ce mode d'attaque. Les calcaires ne sont partiellement dissous que dans leurs fissures. La délapidification des pélites et des argiles est au contraire facile partout, surtout si l'argile est gonflante.

Les altérations à argiles gonflantes qui à moins de 550 mm de pluies envahissent des roches feldspathiques sur des modelés relativement récents correspondent à des drainages faibles assurant le confinement des solutions du sol. Bien qu'elles soient un élément banal des paysages sahéliens on ne peut les tenir pour actives en tous points à cause de l'énorme déperdition d'eau qui limite leur humectation à quelques décimètres en dehors de secteurs d'afflux privilégiés. Leur caractère partiellement obsolescent trouve une confirmation dans l'existence de formations similaires très développées à des latitudes plus basses hors du Niger : à 900 mm au Tchad, à 1 200 mm au Cameroun.

Les lambeaux considérables d'épaisses altérites kaoliniques du Niger occidental sont indiscutablement des fossiles de par leur position stratigraphique. Découpés et isolés des nappes phréatiques actuelles ils ne peuvent plus guère évoluer. Les altérations siallitiques qui demandent une forte humidité et en même temps le lessivage d'une grande partie de l'hydrolysate ne se forment plus au Niger que dans des cortex pelliculaires.

### *L'accumulation de matière organique*

La sécheresse édaphique et les fortes températures sont plus défavorables à la synthèse chlorophyllienne qu'à la minéralisation de telle sorte que les taux de matière organique sont faibles dans tous les sols, même dans ceux qui sont inondés temporairement. Le caractère limitant de la pluviosité est démontré par une corrélation positive entre les taux de matière organique des sols sableux et les précipitations.

### *Lessivage et lixiviation*

La concentration estivale des pluies en un petit nombre d'averses entraîne en tous lieux l'existence d'un « lessivage potentiel » (AUDRY, 1967) au moins sur

quelques décimètres. Il n'existe toutefois de sols lessivés très récents que sur l'isohyète 800 mm. Plus au nord on ne peut constater que l'amenuisement très progressif des épipédons lessivés de sols anciens vers les hautes latitudes ou des traits localisés d'illuviation du fer et de l'argile (cutanes, raies). Ce processus paraît donc persister tout en s'affaiblissant relativement à l'érosion superficielle jusque dans la zone sahéenne pourvu que certaines conditions de chimisme et de régime hydrique soient réunies.

L'équilibre entre la lixiviation des bases et leur libération par la minéralisation est régulièrement déplacé en faveur de cette dernière lorsque la pluviosité décroît. Cette modification continue est également subie par le pH de surface qui atteint la valeur 7, définissant le faciès subaride, entre 400 et 450 mm de pluies sur matériaux sableux.

#### *Régimes exsudatifs ou très contrastés*

Il y a migration par ascensum prépondérante lorsque la nappe phréatique est peu profonde, à moins d'un mètre. Il se forme alors, sur toute l'étendue latitudinale du Niger, des concentrations salines et un type très particulier de concrétionnement ferrugineux. Il semble que la redistribution du calcaire d'anciens horizons carbonatés sous l'action des eaux pluviales seules soit de type ascendant entre 200 mm et 600 mm de pluies. On rattache à ce type de circulation lié aux fortes ETP les vernis ferrugineux si communs sur les débris rocheux parsemant les glacis à moins de 600 mm de pluies.

La rubéfaction, effet ordinaire de régimes hydriques contrastés, se manifeste actuellement en surface de glacis sahéens à argiles gonflantes (vertisols, horizons B de sols solonchiques tronqués). La couleur rouge des horizons B de sols ferrugineux est un caractère ancien. Elle apparaît douteusement à plus de 400 mm de pluies sur des matériaux vieux de 5 000 années ; elle est absente des matériaux plus récents.

#### *Le bilan climatique actuel*

Le climat nigérien est peu actif dans le domaine de la pédogenèse. On ne peut guère lui attribuer directement que des transformations d'épipédons ou des effets modestes en ce qui concerne l'accumulation de matière organique, le mouvement des bases et des sels, de l'argile et du fer, l'arénisation et l'argilisation. Les altérites les plus importantes, siallitiques et smectitiques pro parte, les caractères pédologiques les plus importants : réalisation de profils A-B, rubéfaction, cuirassement, lui sont antérieurs.

Il ne conserve pas davantage, l'homme aidant, les couvertures de sols héritées de périodes plus favorables.

## *La géologie*

### STRUCTURE GÉNÉRALE

Elle se résume à deux vastes cuvettes sédimentaires centrées aux deux extrémités est et ouest du territoire, recouvrant le vieux socle précambrien plissé et arasé.

Le Niger central et occidental est formé d'un ensemble isoclinal de couches à faible pendage s'abaissant de l'Air vers le centre de la cuvette de Dosso au sud-ouest. Les grès du continental intercalaire, du continental hamadien, les calcaires paléocènes, les grès du continental terminal affleurent successivement en auréoles approximativement concentriques, limitées à l'ouest par le môle infra-cambrien du Gourma-Liptako.

La seconde dépression, subsidente, est celle de la cuvette tchadienne à l'est. Elle est limitée au nord-est par les reliefs cristallins du Damagaram et du Mounio.

### LE SOCLE

#### *Le Suggarien du Damagaram et du Mounio (H. FAURE, 1962)*

Il est formé de granites abondants et diversifiés métamorphisant fortement des séries anciennes calcaires et magnésiennes, isolant des quartzites. Les roches les plus répandues sont des granites calco-alcalins à grain moyen ou grossier, des granites hyperalcalins à grain moyen ou très fin, des migmatites et micaschistes relativement basiques, des quartzites. Dans les Damagaram, nivelé par une altération intense (Paléocène ?), seules font saillie les quartzites alors que les granites ne forment que des chaos et que les roches plus basiques disparaissent sous des flats d'argiles gonflantes. Le Mounio, tardivement exhumé de sous la couverture crétacée, a conservé un puissant relief différentiel à inselbergs de roches micro-grenues groupées en anneaux autour de dépressions creusées dans des séries plus grossières et moins alcalines.

#### *Le Birrimien du Liptako (M. JEAMBRUN, E. MACHENS, 1962)*

Ce sont des terrains volcano-sédimentaires, verticaux, métamorphisés, à enclaves de migmatites pré-birrimiennes, troués de batholites concordants de granites syncinématiques, de massifs et filons intrusifs de granites alcalins et de roches basiques. Les roches les plus répandues sont des schistes argileux gris et rouges (quartz, sericite, kaolinite, oxydes de fer), des roches basiques « vertes » (amphibolites, andésites, gabbros), énormément de granites calco-alcalins à biotite et grain moyen. Les faciès très siliceux, métamorphiques (quartz) ou détritiques (Tarwaien), sont rares.

Cette multitude de types pétrographiques ne produit que trois matériaux de sols, à argiles kaoliniques sur un vieux manteau d'altération, à argiles illitiques sur des schistes peu « métamorphisés » délapidifiés, à argiles smectitiques carbonatées sur granites et roches basiques formant à la fois le plancher de glacis relativement récents et le front d'altération général.

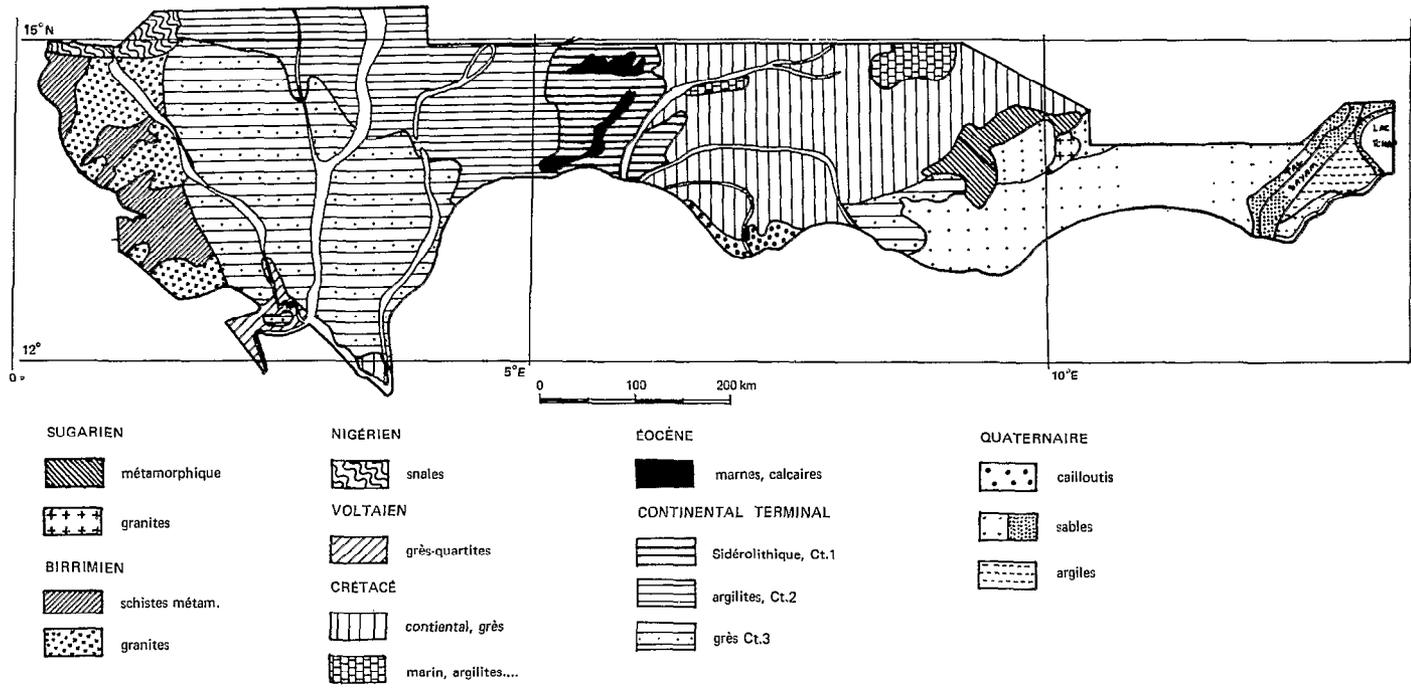


FIG. 3. — Géologie du Niger Méridional

### *L'infra-cambrien du Gourma ou nigérien (REICHEL, 1961)*

La plus grande partie est formée de schistes argileux, chloriteux, sériciteux et kaoliniques, à lentilles et horizons siliceux, plus rarement calcaires. Ces roches n'ont pas été, apparemment, kaolinisées, ayant elles-mêmes la composition d'un éluvial. Les produits d'altération récents sont riches en hydromicas, limoneux, remarquablement imperméables.

### *Le Voltaïen du W du Niger (Série de l'Oti)*

La série disparaît presque entièrement sous une carapace de cuirasses et de grès continentaux. Elle est connue par des grès, grès-quartzites, à septa argileux et schisteux inégalement développés. La surface infra-continentale, exhumée par le Niger et ses affluents, est une succession de profondes dépressions creusées dans les schistes et de barres quartzitiques à l'origine du cours zigzagant du fleuve. La désagrégation granulaire des grès produit une arène très acide, la délapidification des schistes engendre des argiles gonflantes vertiques.

## LA COUVERTURE SÉDIMENTAIRE

### *Le Crétacé (GREIGERT, 1957 - FAURE, 1966)*

La plus grande partie du Niger central et nord-oriental est recouverte de grès tendres continentaux, feldspathiques et argileux (montmorillonite, kaolinite, illite), les uns plus grossiers à intercalations d'argiles sableuses (Continental Intercalaire), les autres plus fins à lentilles argileuses violettes (Continental Hamadien). Ce sont des formations fluviales qui auraient été arrachées à de minces altérites bi-siallitiques du socle cristallin. A l'exception du plateau du Koutous, au nord du Mounio, qui porte des traces d'altération kaolinique, le paysage est entièrement formé de glaciés mous et juvéniles à sols directement issus de la désagrégation des grès.

Des argilites (Turonien), des grès très fins, des marno-calcaires, des argiles gypsifères (Maestrichtien) sont les roches les plus communes des faciès marins du Crétacé Supérieur. En engendrant des sols compacts et érodibles elles individualisent de petites régions à bad-lands dans le Sahel qui s'étend de l'Ader-Douchi au Damergou.

### *Le Paléocène et l'Eocène Inférieur marins (GREIGERT, 1957 - FAURE, 1966)*

Il est représenté par une trentaine de mètres de marno-calcaires encadrés par deux horizons symétriques d'attapulgites papyracées. Son origine serait la phase soluble d'une puissante altération biostasique sur un domaine continental allant du Liptako au Damagaram. Les calcaires sont largement exposés sur les versants des vallées de l'Ader Douchi où ils sont parvenus à une certaine immunité vis-à-vis de l'altération météorique après avoir été anciennement lapiazés et dissous.

### *Le Continental Terminal (GREIGERT, 1957)*

D'âge Oligocène-Miocène, il est discordant sur des altérites kaoliniques, le contact montrant des concentrations alumineuses (bauxites, alunites). Il débute par une dalle sidérolithique à colithes ferrugineuses (plateau de l'Ader Douchi) en

continuité avec l'Eocène marin. Il présente ensuite sur plusieurs centaines de mètres un empilement monotone de roches tendres invariablement à quartz, kaolinite, goéthite, plus gréseuses au centre du Niger occidental (Ct. 3), plus argileuses au nord (Ct. 2). Le tout serait le diluvium rhexistasique du manteau d'altération kaolinique Paléocène.

L'uniformité géographique et temporelle des sols est attribuée à l'homogénéité minéralogique et à la forte évolution de ce matériel. Le paysage topographique est néanmoins plus variable à cause des différences de résistance mécanique : entablements (sidérolithique), plateaux et vallées (Ct. 3), glacis plats (Ct. 2).

#### LE QUATERNAIRE

Le domaine de sédimentation se réduit à la cuvette tchadienne (FAURE, 1966 - PIRARD, 1964) où se déposent les argiles, sables, « croûtes ferrugineuses » du groupe Tchad qui, uniquement connu par sondages, est hors du champ pédologique.

Ailleurs s'étend un domaine d'altération et d'érosion dont les formations superficielles se réduisent presque entièrement à des sols de telle sorte que nous n'en détaillerons l'histoire qu'après avoir traité de ces derniers. Elle débute, à la fin du Pliocène (?), par un puissant cuirassement. Elle se poursuit par la mise en place d'une succession de modelés étagés, ayant chacun son propre système de sols, que l'on interprète par une diminution pseudo-cyclique de la pluviosité et par l'abaissement des niveaux de base. En regroupant ces pseudo-cycles climatiques par affinités pédologiques on définit un certain nombre de formations correspondant par hypothèse à des conditions de milieu voisines ou périodiquement répétées (GAUVAUD, 1970) :

- première formation (Pleistocène inférieur).
  - = unités-roches : cailloutis.
  - = unités-sols : altérites kaoliniques, cuirasses ferrugineuses.
- seconde formation.
  - = unités-roches : cailloutis.
  - = unités-sols : cuirasses ferrugineuses rares, horizons concrétionnés abondants, altérites smectitiques, calcaires.
- troisième formation (Pleistocène supérieur).
  - = unités-roches : graviers, regs, sables fluviatiles et éoliens, argiles alluviales.
  - = unités-sols : sols rubéfiés, sols complexes sur altérites smectitiques, calcaires.
- quatrième formation (Holocène à Actuel).
  - = unités-roches : sables fluviatiles, sables éoliens (rares), alluvions argileuses.
  - = unités-sols : sols brunis, sols hydromorphes, sels solubles.

#### *Déterminisme des sols par les roches*

Au Niger la liaison entre les sols et les roches passe par la minéralogie du plasma minéral libéré par l'altération, par la désagrégation ou la délapidification. Elle est donc définie par l'intensité de l'altération et par la minéralogie des roches, le facteur textural étant secondaire à l'échelle envisagée ici.

La couverture sédimentaire décèle deux altérations anciennes, l'une modérée et bi-siallitique au Crétacé, l'autre très intense et siallitique au Paléocène. La poursuite ou l'héritage de cette dernière sont sensibles pendant la plus grande partie du Quaternaire où la dominance de la kaolinite et des oxydes de fer donne une extrême monotonie à la pédogenèse (sols ferrallitiques et ferrugineux de la première formation).

Plus tard la diminution de l'agressivité climatique combinée avec la mise à nu

des vieux fronts d'altération permet aux roches de s'exprimer au travers de leur transformation en sols :

- séquences à kaolinite (ferrugineux et hydromorphes).
  - = héritée de grès et argilites continentales (Continental Hamadien et Terminal).
  - = héritée d'altérites anciennes : socle du Liptako et du Damagaram.
- séquences à hydromicas (hydromorphes lessivés et ferrugineux).
  - = héritées de schistes séréciteux nigériens et birrimiens.
- séquences à kaolinite et smectites alcalisées (ferrugineux, solonetz).
  - = altération de granites alcalins et calco-alcalins.
  - = héritage et altération d'arkoses, grès arkosiques du Crétacé continental.
- séquences à smectites non alcalisées (sols bruns, vertisols).
  - = altération de roches à feldspath calciques et de roches basiques (amphibolites).
  - = héritage d'argilites et schistes argileux à montmorillonite (parfois à attapulgite) du Crétacé supérieur et de l'Eocène, de marno-calcaires éocènes.

Ce déterminisme par le plasma minéral ne joue pas pour les sables éoliens qui à eux seuls forment une séquence à sols ferrugineux particuliers.

### *Le modelé*

Les formes de terrain n'ont pas été définies indépendamment des sols mais révélées par leur répartition, aussi n'en présenterons-nous ci-dessous qu'une brève description :

— de hauts plateaux tabulaires à entablement ferrugineux sont les témoins d'une surface de cuirassement généralisé fin-tertiaire scellant les grès continentaux et leurs bordures du socle. Il n'existe pas de restes de surfaces similaires plus anciennes au Niger méridional bien que des pédoreliques incluses dans cette cuirasse supérieure en indiquent l'existence passée.

— au-dessous s'étagent des plateaux tabulaires à monoclinaux, des cuvettes perchées, des interfluves isolés, restes de deux à trois modelés cuirassés à glacis<sup>1</sup> peu inclinés se raccordant à des niveaux de base successifs. Ils sont creusés dans des formations kaoliniques et couverts d'une nappe résiduelle ou détritique : éboulis, pavages, cailloutis (première formation).

— plus bas sont des glacis plus récents et fonctionnels sur des roches ou altérations argileuses de nature très variée, d'extension plus septentrionale. Le niveau grossier situé à la base des sols, éluvial et variablement remanié, peut porter les traces de crises érosives attribuées à des péjorations climatiques arides ou désertiques (deuxième et troisième formations).

— l'ensemble peut être dominé ou parsemé de reliefs résiduels en roches nues, à aspect d'inselberg fréquent, de signification variable. Les unes sont des éléments d'une topographie différentielle exhumée de sous une couverture gréseuse Crétacée (Mounio) ou Tertiaire (région du W). Les autres sont des volumes inaltérés jadis inclus dans un épais manteau d'altération (Liptako).

— dans les vallées du socle, intermittentes à l'exception du Niger, une nappe de graviers est enfouie sous des sables fins généralement argileux et rubéfiés. Dans ces derniers s'emboîte un second remblai à sols plus juvéniles ; il est lui-même colmaté des alluvions correspondant à peu près au lit majeur actuel.

— les vallées creusées dans les grès, Goulbi du Crétacé et Dallols du Tertiaire, sont sèches, à fond plat, presque entièrement remblayées de sables très pauvres en fines généralement étagés en deux niveaux principaux.

---

1. Glacis : surface monoclinale à pente faible et régulière, généralement linéaire ou peu concave, dont l'évolution est déterminée par la présence d'un matériel, roche ou altération, meuble.

— deux systèmes dunaires successifs à sols rouges inégalement évolués et à géométrie souvent différente oblitérent plateaux, glacis et vallées aussi bas que l'isohyète 800 mm.

— un troisième ensemble de formes éoliennes mineures et localisées ne porte que des sols juvéniles bruns.

— la cuvette tchadienne est presque entièrement masquée de sables pédologiquement analogues à ceux des Dallols, localement déformés de trains dunaires comparables à ceux du second système d'ergs. Deux hauts niveaux lacustres y ont laissé des plages et des cordons sableux portant les mêmes sols bruns que les formes éoliennes mineures. La Komadougou en a colmaté la partie centrale de dépôts où l'on sépare un remblai de sables rubéfiés d'argiles et de sables alluviaux plus récents analogues à ceux des lits majeurs.

## *La végétation*

### CLASSIFICATION

L'aridité appauvrit la végétation et en diminue le volume vers les hautes latitudes. Les unités forestières d'AUBREVILLE (1949) décrivent cette zonalité au niveau de la strate ligneuse : la Province Boréale Occidentale des formations steppiques et désertiques a pour limite sud l'isohyète 400-450 mm qui est également celle des sols subarides. Elle envoie des irradiances jusqu'à 650 mm sur des glacis argileux peu perméables. La Province Boréale des forêts claires et des savanes boisées occupe le reste du territoire où, tout au sud, des affinités guinéennes ont été notées (Gaya). Les graminées sont l'essentiel de la strate herbacée. Jusqu'à 400-450 mm s'étendent des prairies annuelles sahéliennes. Des prairies sahélo-soudanaises leur succèdent jusqu'à 700-800 mm, remplacées au-delà par la savane vivace à andropogonées soudanaises. Partout des steppes herbeuses vivaces exploitent les plus sableuses, alors que les prairies des sols halomorphes et hydromorphes sont d'autres spécialisations édaphiques.

### FORMATIONS STEPPIQUES

Dans cette région climatique les facteurs édaphiques tels que le régime hydrique, la richesse en bases contrôlent d'autant mieux les groupements floristiques, les taux de couverture, la géométrie des strates que les sols y sont plus divers et que l'aridité en accroît la spécificité de comportement. L'unité de la végétation n'y est de ce fait que vaguement physionomique, steppes et savanes arbustives à épineux y dominant.

#### *Savanes arborées et steppes arbustives de sols perméables*

Sur les ensablements riches en bases, à Ph neutre du socle et des marges péri-lacustres croissent des savanes arborées et arbustives à *Acacia* (*A. raddiana* et *laeta*), *Salvadora persica*, avec tapis prairial annuel à base d'*Aristida mutabilis* et *Cenchrus biflorus*.

Sur les ensablements plus pauvres des grès, schistes, ce premier ensemble est remplacé par les steppes arbustives à *Commiphora africana* et *Euphorbia balsamifera* (anthropophile). Le graminé s'enrichit en espèces plus méridionales adaptées aux sols plus acides : *Ctenium*, *Heteropogon*. La concentration relative de la strate ligneuse et de certaines graminées vivaces (*Cymbopogon*, *Andropogon laniger*) dans les dépressions des modelés dunaires y produit un aspect photographique particulier, réticulé, caractéristique des ergs les plus anciens du Koutous au Gourma.

#### *Steppes arbustives et brousses des sols peu perméables*

Les steppes arbustives à *Acacia seyal* sont spécifiques des glacis à argiles gonflantes calciques sur lesquels elles descendent jusqu'à l'isohyète 650 mm. Elles y adoptent souvent une disposition en « brousse tigrée », adaptation active de la végétation à l'état physique de la surface des sols. Les séquences à smectites sodiques, plus complexes, ont aussi une composition floristique plus variée, avec des espèces spécifiques (*Lannea humilis*), ou venues de milieux plus perméables (*Acacia raddiana*) ou acides (*Commiphora*).

Les sols désaturés sont couverts de steppes arbustives irrégulièrement contractées à *Commiphora africana* et *pedunculata*, associées à des espèces de sols très compacts : *Combretum micranthum*, *Dichrostrachys glomerata*, ce dernier parfois exclusif (schistes nigériens).

#### *Steppes herbeuses vivaces*

Les sables très pauvres en fines de la cuvette tchadienne des vallées sèches et des grandes rides dunaires sont presque entièrement dépourvus d'arbres et couverts des touradons de graminées vivaces, *Aristida longiflora* et *Hypparhenia dissoluta*. Les quelques arbres qui la parsèment appartiennent aux savanes à *Acacia raddiana* ou bien à des irradiations de formations plus méridionales à Combrétacées (*Combretum glutinosum*, *Terminalia avicennoides*).

L'éolisation subdésertique climatique de l'ensemble de la couverture sableuse favorise d'abord le développement des steppes herbeuses à *Aristida*, puis celui des steppes plus clairsemées à *Aristida plumosa* et *Panicum turgidum*, caractéristiques des dunes semi-fixées.

#### *La végétation des sols hydromorphes*

Lorsque l'engorgement n'est pas trop prononcé la végétation des sols hydromorphes conserve une tonalité sahélienne : bois armés à *Acacia nilotica*, *seyal*, landes à buissons d'*Indigofera*, à *Bergia suffruticosa*.

### LA PROVINCE BORÉALE DES FORÊTS CLAIRES ET DES SAVANES BOISÉES

L'uniformisation des sols par généralisation des séquences à sols kaoliniques désaturés redonne à la zonalité climatique une part prépondérante dans le découpage de cette très vaste province.

### *Savanes arborées à Combrétacées*

Elles limitent au nord la Province entre 450 et 600 mm de pluies sur les sols ferrugineux de la couverture sableuse ancienne. Au *Combretum glutinosum* s'associent diverses espèces plus sensibles aux nuances de l'édaphisme : *Terminalia avicennoides* des sols les plus secs, *Combretum nigricans* des sols les plus acides (Continental Terminal), *Sclerocarya birrea* des sols point trop désaturés (Crétacé, Birrimien). Le graminé y est une prairie sahélo-soudanaise typique à *Ctenium elegans*, *Heteropogon hagerupii*, *Loudetia hordeiformis*. Dans les aires cultivées, ici fort étendues, le *Faidherbia albida* et le *Guiera senegalensis* décèlent parcs et jachères.

### *Savanes boisées*

Les espèces précédentes sont surcimées entre 600 et 800 mm par diverses essences : *Bombax costatum* (Continental Terminal), *Boswellia dalzielli*. Dans les jachères subsistent seuls *Prosopis africana* et *Butyrospermum parkii*, le recrû arbustif étant fourni par *Bauhinia (Ptilostigma) reticulata*. A plus de 650 mm de pluies des Andropogonées vivaces apparaissent dans la prairie sahelo-soudanaise à *Ctenium*.

### *Forêts claires*

On ne les trouve plus que dans des réserves naturelles ou artificielles à plus de 800 mm de pluies sur des sols ferrugineux lessivés. *L'Anogeissus leiocarpus* y domine, associé à *l'Azelia africana*, à *l'Isobertinia doka*, au *Burkea africana*. Les espèces des savanes y forment le sous-bois, mêlées à des espèces plus spécifiques (*Bauhinia thonningii*, *Crossoptery febrifuga*...). Le tapis herbacé est vivace, à base d'Andropogonées.

### *Brousses et halliers à Combrétacées et Acacia lianescents*

Ces formations se substituent aux savanes et dans une moindre mesure aux forêts claires lorsque des horizons B ferritisés et autres substrats imperméables, désaturés, ferrugineux sont dénudés par l'érosion. Inféodées aux reliques des modelés cuirassés elles parviennent avec eux jusque dans la Province steppique. La strate caractéristique buissonnante est formée de *Combretum micranthum*, *Acacia macrostachya* et *ataxacantha*. Diverses dispositions contractées naissent de l'adaptation à l'insuffisance des réserves hydriques : brousses « annelées » sur grès Crétacés, brousses « tigrées » sur les entablements ferrugineux du Continental Terminal.

### *Végétation des sols hydromorphes et halomorphes*

Elle dépend de la durée de l'engorgement et de la texture. Aux valeurs moyennes de ces facteurs correspondent des savanes arborées à *Myrtagyna inermis* avec graminé vivace à Vetivers. Aux valeurs fortes correspondent des prairies prostrées à *Echinochloa*, des roselières (marais phréatiques de substrats sableux). Les bordures salées du lac Tchad, des aires d'émergence des nappes, sont couvertes d'une prairie à *Sporobolus* localement parsemée de *Tamarix*.

## *Histoire des peuplements végétaux*

Elle repose sur l'hypothèse qu'à l'adaptation édaphique des formations végétales doit correspondre une histoire parallèle de la végétation et des sols.

Le fonds primitif est celui des forêts actuellement méridionales encore liées aux sols ferrallitiques et ferrugineux les plus anciens qui ont longtemps recouvert la totalité du Niger. Un sous-ensemble, à l'origine des brousses à Combrétacées, en a été isolé par la dénudation des horizons ferritisés.

A la suite d'une aridification progressive un premier stock sahélien, encore adapté aux sols acides, celui des *Commiphora*, est apparu au nord. Lorsque les argiles gonflantes à sols à pH élevé se sont étendues sur les glacis une deuxième population, formée d'*Acacia*, a suivi.

Les peuplements pionniers qui ont suivi les épisodes désertiques étaient des steppes d'épineux sur les substrats imperméables et érodés, des steppes herbues sur les sables filtrants. Le chimisme local, le plus souvent hérité des sols anciens, a alors déterminé l'implantation de tel ou tel stock sahélien. Les espèces du sous-bois de forêts claires ont recolonisé ensuite les sols perméables, jusqu'à s'avancer en pleine zone sahélienne sur les dunes les plus meubles. Seule la brousse à Combrétacées a été capable de reconquérir une partie des modelés à sols désaturés peu perméables avec une réussite inégale, très élevée sur les entablements ferrugineux, très moyenne sur les argilites continentales (Ct. 2).

La pratique millénaire de la culture à la houe, éliminant la strate ligneuse et favorisant la prairie aux dépens de la savane herbeuse vivace, a ensuite fait régresser les forêts claires vers le sud, ouvrant entre 400 et 800 mm de pluies des campagnes de savanes très ouvertes. Ces premiers défrichements ont précipité des déséquilibres latents et accéléré l'érosion des sols, notamment sur les remblais fluviaux.

## *L'utilisation des sols*

### FACTEURS CLIMATIQUES

Pâturages et cultures sont nettement zonés au Niger où les réserves hydriques des sols les plus utilisés, fort perméables et bien drainés, dépendent essentiellement de l'équilibre pluviométrique. Il n'y a pratiquement que des pâturages à moins de 350 mm. Entre 350 et 450 mm les millets associés aux niébés s'étendent progressivement. Entre 450 et 600 mm le sorgho et l'arachide apparaissent en cultures intercalaires. De 600 à 800 mm les arachides à long cycle sont cultivables dans tous les sites. Elles sont associées au sorgho, au millet, au niébé. Cette zone agricole est la plus peuplée. A plus de 800 mm le coton, jusque là cultivé sur des sols irrigués riches, peut être étendu à des terres plus pauvres. Dans les champs de céréales le sorgho prend le premier rang et le maïs fait son apparition.

Aux cultures pluviales s'ajoutent des cultures irriguées et de décrue, de saison fraîche (blé dur, légumes) ou chaude (riz).

## FACTEURS ÉDAPHIQUES

Les agriculteurs nigériens ont davantage développé les techniques d'utilisation des sols les plus légers (sols ferrugineux peu lessivés) que celles convenant à des sols plus lourds. Les sols sableux à sablo-argileux les plus recherchés ont soit des réserves minérales meilleures (ensablements du socle cristallin, des grès Crétacés), soit un modelé aplani limitant les pertes d'eau (ergs anciens méridionaux), soit une nappe phréatique point trop profonde (vallées « sèches »). Les plus pauvres, les plus acides (Ct. 2), ceux qui ont en même temps les pentes les plus fortes (vallées sur grès continentaux Ct. 3), sont délaissés en totalité ou partie. Les sols les plus sableux dont les réserves hydriques sont de l'ordre de 20 à 30 mm (dunes plus récentes septentrionales) sont abandonnées aux troupeaux sauf à la limite nord des cultures où leur très grande perméabilité leur redonne un certain avantage.

Les sols ferrugineux lessivés, plus argileux, ne sont que rarement cultivés au sud du territoire. Leurs restes érodés, cuirassés et gravillonnaires, forment des surfaces inutilisables considérables, surtout au Niger occidental.

Bien que chimiquement riches les sols sur argiles gonflantes ne sont pas cultivés hors de quelques flats alluviaux, car des travaux de petite hydraulique sont nécessaires à leur humectation et leur ameublissement n'est pas réalisable avec l'outillage courant.

Les sols hydromorphes sont très inégalement utilisés, en dépit d'une fertilité potentielle souvent grande. Les rizières (Niger) et les cultures phréatophiles (cuvette tchadienne) y forment l'essentiel des champs.

## INCIDENCE SUR LES SOLS

La proportion utilisée annuellement des terres cultivables est de 12 % en moyenne, avec un maximum de l'ordre de 25 %. En dépit de ce caractère extensif l'utilisation des sols nigériens a été suffisamment longue pour qu'elle ait profondément modifié le couvert végétal et les caractéristiques édaphiques qui lui sont liées tels les taux de matière organique, l'épaisseur et la structure des épipédons, le régime hydrique. L'équilibre entre la fertilité naturelle, la pluviosité, les techniques traditionnelles a atteint un palier assez bas sur les terres sableuses, trop exclusivement recherchées.

## LE MANTEAU D'ALTÉRATION KAOLINIQUE

### *Généralités*

Des grès et des cuirasses ont protégé de l'érosion des lambeaux d'horizons d'altération, rarement alumineux, épais. Actuellement dispersés sur tout le Niger ils sont identifiés à un même manteau d'altération qui se serait développé sur les continents émergés du Paléocène en milieu biotastique, alimentant de sa phase migratrice soluble les dépôts marins du centre du Niger (FAURE, 1966 - GREIGERT, 1967). Des mouvements tectoniques auraient favorisé l'érosion inégale de ces altérites et l'accumulation du matériel résiduel dans la cuvette Tertiaire du Niger moyen dont les grès ont effectivement la minéralogie d'un reliquat d'altération (au sens de PEDRO, 1964). Sur les aires anciennement kaolinisées les modelés Quaternaires les plus vieux se sont enfoncés dans ce matériau résiduel où il existait encore : sols et formes convergent alors vers ceux des surfaces sur grès kaoliniques correspondantes. Soit que le front d'altération ancien n'ait été que tardivement rattrapé, soit que la kaolinisation se soit maintenue, des produits d'altération différents, à argiles gonflantes, n'apparaîtront que tardivement sur des modelés plus bas et récents.

Les kaolins et les rares formations alumineuses associées s'observent soit sous des cuirasses pliocènes et quaternaires du socle occidental et oriental soit sous les grès Tertiaires du Niger moyen au contact de ce même socle. A l'intérieur du « domaine d'altération » défini par ces divers témoins des lacunes importantes sont attribuées soit à une expression difficile de l'altération, d'origine minéralogique, soit à l'extension généralisée des modelés les plus récents.

### *Les kaolins sous cuirasse*

#### SITES

Ils se localisent tous sur granites ou migmatites à l'exception de restes sur schistes observés sur le « Buem » du parc du W. Ce sont des buttes dont

l'entablement ferrugineux protecteur appartient le plus souvent à la surface fin-Tertiaire, parfois aux modelés cuirassés sous-jacents. Sous l'escarpement est un versant raide protégé par un éboulis localement raviné et montrant alors les kaolins. La base passe progressivement à une arène argileuse puis à la roche altérée et se raccorde abruptement à ce niveau aux glacis fonctionnels. L'analogie de cote et de faciès des horizons profonds du manteau et de l'altération grossière des modelés les plus bas entraîne l'hypothèse de l'homologie du front d'altération Paléocène avec le niveau topographique moyen des glacis fonctionnels, ce qui a pour conséquence :

- de donner au manteau une grande épaisseur
  - 40 à 70 m pour les kaolins
  - 6 à 14 m pour les horizons arénacés
  - 20 à 26 m pour la roche altérée.
- de faire du manteau le matériau dans lequel s'est enfoncé le système des modèles quaternaires, le modelé inférieur râclant en quelque sorte le front d'altération.
- de tenir pour secondaires les modifications ultérieures du manteau dans son chimisme et dans la topographie du front d'altération. Cela est plausible des modelés supérieurs et des aires kaoliniques des modelés inférieurs mais entraîne pour les aires à argiles gonflantes de ce dernier l'hypothèse supplémentaire que ce nouveau type d'altération n'est pas celui d'une roche saine mais celui d'un matériel préalablement modifié. Deux observations viennent appuyer cette interprétation : septa d'argiles gonflantes inclus dans une altération kaolinique, circulation de sodium à la base de buttes à kaolin.

#### CONSTITUTION DES KAOLINS

Ce sont des argiles sableuses onctueuses, roses et violettes, à fantômes cristallins ferritisés ou blanchis. Elles contiennent pour l'essentiel 20 % à 40 % de quartz résiduels fortement cariés, 45 % à 50 % de kaolinite, 5 à 10 % de goethite. Le plasma ferrugineux s'assemble souvent en globules indifférenciées de la taille des limons ou des sables fins résistant à l'analyse mécanique (40 à 50 %). La goethite est parfois micro-sphérulitique. La gibbsite et l'oligiste sont improbables, les ferromagnésiens sont négligeables (moins de 1 %), les feldspath résiduels sont rares (2-3 %) mais les phyllites potassiques sont appréciables : 3-15 %.

Cette altération, s'exerçant sur un granite calco-alcalin moyen, suppose le maintien du fer et de l'aluminium, l'élimination du tiers de la silice combinée, de 9/10 des bases. Bien que micro-morphologiquement visible, l'altération du quartz n'est pas décelée par les analyses chimiques.

#### *Les kaolins sous grès*

##### SITES

La profonde entaille de la vallée du Niger montre sous les grès Tertiaires dix à quarante cinq mètres d'un matériel présentant la même succession d'horizons que le manteau d'altération recouvrant le socle. L'identification des deux ensembles est

confirmée par des observations faites au niveau de la « cuesta » séparant les grès du socle à l'est du fleuve. On retrouve, de haut en bas, les kaolins, les arènes kaoliniques, la roche altérée. Les horizons inférieurs sont situés au niveau d'une terrasse et du lit majeur où des argiles gonflantes s'y imbriquent et où apparaissent des sels de sodium. Le contact des grès a coupé le manteau à des niveaux variables et l'a parfois remanié en tout ou partie en brèches, arkoses. Il est souvent très fortement ferrugineux (grès colithiques), ce joint induré ayant ultérieurement guidé le creusement de glacis Quaternaires.

## CONSTITUTION

Les kaolins sont formés du même mélange de kaolinite, de goethite, de quartz et de silicates résiduels. Les géologues y ont décelé la présence fréquente de traces d'alunite (COLLIN DUFRESNE, 1961). Ce minéral a donné lieu à des concentrations identiquement situées au Niger saharien (FAURE, 1966) où il est attribué à l'altération associée de la pyrite et de silicates potassiques. Son association constante avec la kaolinite indiquerait un produit normal de l'altération sialitique.

### *Autres altérations kaoliniques*

Au Niger oriental, sur les granites alcalins et calco-alcalins du Damagaram, de rares buttes montrent des restes attribués au manteau Paléocène, consistant en kaolins roses ou en argiles arénacées. Ces dernières, épaisses de quelques mètres seulement, montrent une zonation intéressante vers la roche-mère : illite-kaolinite puis illite-montmorillonite-kaolinite-carbonates, paragenèses attribuables aux conditions hydrodynamiques régnant à la base du manteau.

L'absence de telles formations et une topographie montinsulaire tourmentée indiquerait que dans le Mounio le socle n'a pas été atteint par cette puissante altération (cf. p. 13). Elle est remplacée par des cortex décimétriques plaqués sur la roche, en sites bien drainés mais enfouis sous un sol complexe métrique à faciès ferrugineux. Ces écailles d'altération, observées également au Damagaram au niveau du front rocheux exhumé, sont formées d'un squelette quartzo-feldspathique et d'un plasma peu abondant essentiellement kaolinique zoné vers la roche, ex. : kaolinite-illite-chlorite-goethite-gibbsite (traces) puis kaolinite-illite-montmorillonite-gibbsite. Des circulations de carbonates de calcium, de quartz finement pulvérisé, d'oxydes de manganèse, la précipitation en cuirasse d'hydroxydes de fer y sont communs. Ces paragenèses sont suffisamment sensibles aux conditions de site pour être tenues pour compatibles avec les pédoclimats actuels. Certaines d'entre elles ont cependant un âge suffisamment grand pour avoir été fossilisées par des dunes anciennes.

## *Les lacunes dans l'extension du manteau kaolinique*

### SCHISTES ET SHALES BIRRIIMIENS ET NIGÉRIENS

Tendres, argileux, formés de quartz, oxydes et hydroxydes de fer, de kaolinite, d'illite, de séricite et de faibles quantités d'albite et de gibbsite ils ont la minéralogie d'une altérite mais aussi tous les caractères d'extension, d'homogénéité, de dynamo-métamorphisme de puissantes séries schisteuses. Ils conservent toutes leurs caractéristiques jusque sous la cuirasse pliocène dont ils ne sont séparés que par quatre à cinq mètres d'argile rouge dont l'altération, associée à la ferritisation, n'est que la suite de celle des horizons de cuirasse (cf. chapitre suivant). Ils sont donc l'équivalent minéralogique et topographique du manteau kaolinique des granites mais s'en distinguent par leur puissance (150-200 m, DUCÉLLIER, 1958) et par leur structure. Pour expliquer cette association minéralogique anormale pour des roches métamorphiques on en a fait le reliquat de l'altération de « schistes verts » (DUCÉLLIER, 1958), eux-mêmes issus de l'altération de roches basiques massives (WACKERMAN, 1967).

Les relations entre ce catamorphisme et l'altération à kaolins sont incertaines. L'hypothèse la plus simple est d'admettre l'antériorité des shales. Elle a pour conséquence de faire de ces derniers un matériau à la fois insensible à la kaolinisation et sensible à l'altération associée à la ferritisation en cuirasse.

### GRÈS CRÉTACÉS

Riches en minéraux altérables (feldspath, micas) ces grès sont susceptibles d'une kaolinisation qui cependant ne paraît se manifester que dans les plateaux du Koutous où, sur une cinquantaine de mètres, la formation montre des galets de roches cristallines très altérés et un enrichissement en kaolinite (FAURE, 1966). Ailleurs la jeunesse du modelé serait responsable de l'absence de restes du manteau.

## *Conclusions*

### NATURE DU MANTEAU KAOLINIQUE

Les kaolins sont l'horizon le plus épais et le plus caractéristique d'une épaisse écorce d'altération qui atteint 70 mètres près de la vallée du Niger. Son développement est maximum sur les granites. Son développement est indéterminable sur les roches dont la minéralogie est précisément celle de son éluviat, formé de 50 à 80 % de kaolinite, de phyllites résiduelles potassiques, de goéthite, d'alunite. Il ne contient pas de gibbsite à des taux mesurables. Cette altération résulte de l'élimination des bases, d'une partie de la silice combinée, du maintien des sesquioxydes et du quartz qui forme l'essentiel du résistat.

### HYPOTHÈSE SUR LE RÔLE DU MANTEAU DANS L'ÉVOLUTION DES SOLS ET DU MODELÉ

Il s'insère dans la succession de phases d'altération suivante :

— catamorphisme de schistes verts, voire de roches basiques, à l'origine des shales Birrimiens.

— phase du Mounio dont le front d'altération est fossilisé par les grès Crétacés.  
— phase des kaolins Paléocènes qui aboutit à un nivellement plus poussé du plancher rocheux.

— phase de la cuirasse Pliocène (cf. chapitre suivant) : formation de gibbsite au sommet ferritisé des kaolins et roches kaoliniques.

— phases quaternaires récentes sur les fronts anciens exhumés. En sites bien drainés et peu couverts cortex à kaolinite et traces de gibbsite ; en sites mal drainés argiles gonflantes et carbonates des modelés inférieurs.

Dans la suite de cet article on a pris comme hypothèse de base que les divers horizons du manteau kaolinique avaient déterminé le façonnement du modelé Quaternaire et largement contribué aux matériaux de sols :

— les hauts modelés y ont été creusés et lui doivent leur topographie molle, l'uniformité de leur pédogenèse et de leur minéralogie.

— le front d'altération a guidé la formation du front rocheux actuel des bas-modelés.

— à ce niveau la production d'argiles gonflantes a été favorisée par héritage, par transformation de la roche, par circulation de bases encore visible aux pieds de buttes-témoins.

On prévoit ainsi deux modes de liaison entre les deux grands types d'altération, siallisation et simatisation :

— sur le domaine d'extension du manteau Paléocène les smectites des modelés inférieurs sont un héritage topographique et minéralogique de la zonalité verticale de la vieille altérite. Il n'y a plus de relations entre les deux altérations que ponctuelles.

— dans le Mounio l'héritage n'est plus qu'une topographie contrastée en roche nue sur laquelle se différencie une chaîne d'altération qu'il faut rapprocher de celle que décrit BOCQUIER (1967) au Tchad.

## LA CUIRASSE SUPÉRIEURE

### *Les sites*

#### CARACTÈRES GÉNÉRAUX

Des reliefs tabulaires dont la surface varie de quelques ares à 2 000 km<sup>2</sup> dominent les paysages du Niger méridional. Ils sont établis sur des formations kaoliniques tendres, roches ou altérites, et protégés par un entablement ferrugineux où se reconnaît le plus souvent une cuirasse épaisse à morphologie spécifique. Cette dalle est tronquée, disloquée par suffosion, secondairement ferritisée, couverte d'une mince formation meuble, kaolinique et ferrugineuse, où se différencient des sols régiques à faciès ferrugineux sous le couvert de peuplements arbustifs fortement et irrégulièrement contractés.

#### RÉPARTITION RÉGIONALE

Ces témoins débordent largement en latitude le Niger méridional où ils ont été observés entre 15° 20'N et 11° 40'S. Leur abondance dépend du substrat géologique. Elle est maximum au centre du bassin continental Tertiaire où 28 000 km<sup>2</sup> de plateaux définissent avec les vallées ensablées qui les séparent une région naturelle de 58 000 km<sup>2</sup>. Leur ensemble dessine une vaste cuvette structurale, centrée sur le bassin, à pentes faibles et régulières (0,6 ‰). Elle est parsemée de cirques d'effondrements, découpée en tables alvéolaires, surmontée d'une nappe détritique autochtone à aspect de reg de dissociation, fossilisée de voiles et d'alignements éoliens. A l'ouest cette surface dessine un vaste versant drainant du socle du Liptako vers les grès, aux pentes plus fortes et irrégulières (1-5 ‰). L'érosion n'en a laissé qu'un semis de petites buttes tabulaires, plus abondantes sur les schistes que sur les granites. A l'est, après une lacune sur argilites tertiaires (Ct. 2), les très grands plateaux du sidérolithique (Ct. 1) ont la situation topographique du versant oriental de la surface. Leur entablement n'est cependant pas formé par une cuirasse, mais constitué par des grès ferrugineux plus cohérents que le reste de la formation avec des traces d'altération. Pour accepter l'équivalence chronologique il faut admettre la

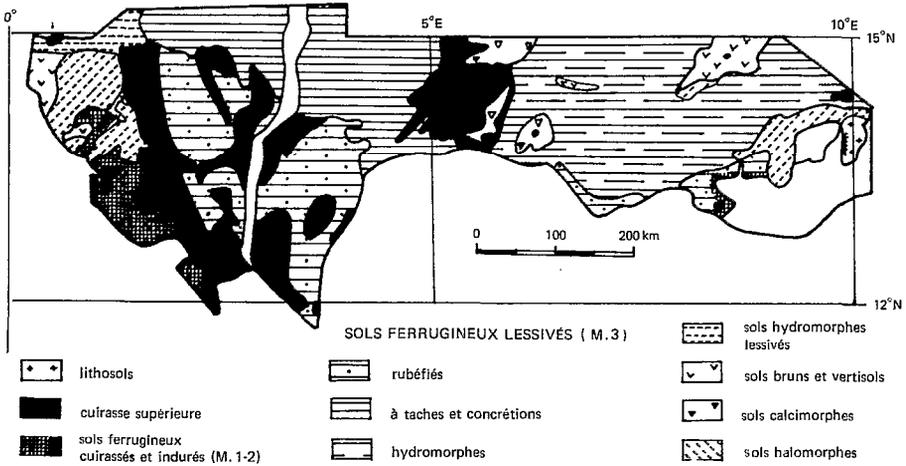


FIG. 3

résistance des grès très ferrugineux aux processus qui ont formé la cuirasse supérieure. Diverses observations à grande échelle confirment cette interprétation générale que la morphologie de cuirasse ne s'est pas exprimée où affleuraient des bancs de grès limonitiques massifs ou colithiques. Au Niger oriental et central le Crétacé, très érodé, n'a d'autres reliefs que les buttes ou petits plateaux du Koutous et du Damergou, coiffés de conglomérats ferritisés à grès colithiques, inclinés vers la cuvette tchadienne, douteusement identifiables à la cuirasse supérieure du Niger occidental.

#### HISTOIRE DES SOLS ET DU MODELÉ

La haute surface cuirassée s'est formée et indurée après l'altération kaolinique du socle et après le dépôt des grès tertiaires, avant le creusement des glacis et versants, ce qui l'assimile aux reliefs estimés Pliocènes du Mali (VOGT, 1959) et moins sûrement à la pénélaine Tertiaire du Haut-Niger (URVOY, 1942). Essentiellement structurale, située au centre d'un bassin, elle a acquis sur les grès du Niger occidental des caractères d'aplanissement et de cuirassement généralisés qui la distinguent de ses homologues habituellement décrits comme des paysages de collines. Pendant le Quaternaire elle a subi un découpage et un déblaiement qui se sont accentués du centre vers les bordures soulevées du bassin (FAURE, 1966) et ont régionalement varié selon la lithologie locale. Pendant que versants et glacis, successivement façonnés et cuirassés, faisaient reculer les plateaux, la surface de ces derniers se trouvait d'effondrements circulaires, était sillonnée d'un réseau de drainage actuellement perché, jamais très incisé ni défini. Des cuirasses secondaires de lessivage oblique, peut-être associées à des sols ferrugineux lessivés, se mettaient en place dans ces diverses dépressions. Des éboulis fossilisèrent les flancs des reliefs tabulaires. L'ablation des horizons meubles des sols anciens fut parachevée lorsque l'entablement fut remanié en reg, ciselé par la corrasion éolienne, enfoui sous des

dunes. La topographie ne paraît avoir guère changé depuis. Des sols ferrugineux médiocrement différenciés ont transformé l'ensemble de la couverture superficielle, éolienne ou remaniée.

### *Caractéristiques de la cuirasse supérieure*

#### MORPHOLOGIE

A toutes les latitudes et sur toutes les roches, les grès très ferrugineux exceptés, elle présente une étonnante similitude de faciès faite de :

- une grande épaisseur des horizons indurés, pouvant atteindre dix mètres.
- une succession constante d'horizons nombreux et structuralement bien distincts : au sommet un horizon pisolitique, parfois accumulé en poches ou en remplissages fissuraux, puis un horizon massif à porosité très grossière tubulaire ou alvéolaire, ensuite un horizon nodulaire, enfin un horizon de transition au matériau par ferritisation, souvent pseudo-bréchique, parfois à forte porosité alvéolaire.
- ciments ferrugineux très denses et durs, de teintes vives violacées (5 R et 7.5 R 3/3 ou 2/4) ou rouges sombres (7,5 R et 10 R 3/4).
- la présence dans ces derniers de plages scoriacées à bariolage vif et complexe, correspondant à une organisation micromorphologique bien définie.

#### MICROMORPHOLOGIE

Le squelette se réduit à du quartz très carié disparaissant progressivement de bas en haut des horizons indurés, probablement par dissolution. Les minéraux altérables sont exceptionnels : tourmaline, amphiboles. Le plasma est formé de kaolinite, parfois de phyllites héritées (illite des shales), de goethite et d'hématite en mélanges diversement dosés et cristallisés. Ces derniers peuvent être classés en un petit nombre de phases selon leur texture et leurs assemblages élémentaires. Les phases montrent des transformations de même nature entre volumes texturaux d'un même horizon et entre volumes texturaux homologues des horizons d'un même profil. Ces transformations permettent de classer les phases en deux suites ou séries compréhensives. Les phases les plus différenciées se situant toujours où les modifications pédologiques ont eu le plus de chances d'être longues et intenses, sommets des cuirasses ou centres des glebules, chacune des séries a une valeur évolutive et exprime une succession continue de mécanismes physicochimiques résumée ci-dessous :

##### I — Série à kaolinite, goethite, hématite

- a = état initial - plasma argilasetique incolore ou diffusément coloré par les sesquioxydes.
- b = altération en micropeds argileux et en flocons sesquioxydiques — apparition simultanée d'une fabrique bimassepique et de glebules sesquioxydiques indifférenciées, à formes tourmentées, limites diffuses, disposition grégaire non orientée (aspect de plasma floconneux).

- c = renforcement du réseau de séparations plasmiques, des faces des micropeds par une charpente sesquioxydique — aspect de plasma cloisonné.
- d = décomplexation, décoloration puis disparition du plasma argileux ; séparation et concentration de goethite en micro-sphérulites ; formation d'une forte porosité méso et micro ; aspect de plasma sesquioxydique lacuneux ; aspect macroscopique scoriacé.
- e = ferritisation dense finale et deshydratation — surcharge en hematite de la charpente sesquioxydique ; aspect de plasma compact et opaque.

## II — Série à goethite et kaolinite

- a = stade initial asepique ou bimassepique.
- b = stade omnisepique.
- c = stade cristallin (sphérulites, rosettes, feuilletés et tubes cristallins).

Les traits pédologiques sont essentiellement formés de nodules résultant d'une augmentation locale des mécanismes de ferritisation, décomplexation producteurs des plasma alvéolaires, lacuneux et compacts. En dépit de leur apparence macroscopique les cutines péri-nodulaires ne sont pas illuviales mais sont une simple réorganisation de la matrice autour des modules, selon les mêmes mécanismes qui produisent ces derniers. Leur organisation rythmique suggère une orientation de la matrice autour du corps nodulaire rigide suivie de la ferritisation des séparations, le processus se répétant à la périphérie de la sub-cutine ainsi formée. La seconde série plasmique est à l'origine de traits cutiniques visiblement tardifs : remplissages fissuraux, radiaux, ou concentriques aux nodules. Il existe également des tubes calcédonieux ou kaoliniques à la base des cuirasses, des pédotubules d'âge égal ou inférieur à la ferritisation principale ou encore héritées (grès).

Les horizons macroscopiques correspondent à des différences dans la masse relative et dans l'évolution des volumes nodulaires, ces derniers issus des mêmes mécanismes de ferritisation d'une trame argileuse à partir de centres privilégiés. Les horizons inférieurs sont fondamentalement noduleux et leurs aspects variés tiennent aux proportions relatives des volumes ferritisés, à l'héritage structural de la roche, à l'érosion endogée (porosité grossière). L'horizon massif sus-jacent est en fait formé de volumes nodulaires géants coalescents et conserve nombre de lithoreliques. L'horizon pisolitique est dû à une multiplication des centres de ferritisation associée à un fort développement des micro-peds. Il a pour origine un régime hydrique moins uniforme et périodiquement plus sec qu'en profondeur. Dépourvu de toute trace de structures héritées de la roche-mère, il peut être considéré comme la base du solum, les autres horizons étant le sommet altéré et ferritisé du matériau.

## INTERPRÉTATION DES DOSAGES CHIMIQUES

Le cuirassement combine la ferritisation et une altération allitique. Le quartz est dissous et compte pour moins de 5 % du poids total. La moitié environ de la kaolinite est détruite (15-40 % du poids total). Les phyllites potassiques disparaissent. Une très petite partie de l'alumine libérée s'accumule (2 à 6 % de « gibbsite virtuelle »). L'accumulation absolue des sesquioxydes de fer croît vers le sommet de la formation (14 à 40 %). La deshydratation augmente parallèlement : elle est réalisée à 50 % dès le stade c (plasma cloisonné), à 100 % au stade final (plasma compact).

Des taux plus élevés d'éléments résiduels (titane, quartz) dans les horizons pisolitiques y impliquent des mécanismes d'apport ou de concentration du squelette qui ne paraissent pas avoir touché le reste de la cuirasse.

## CONCLUSIONS

### *Nature du cuirassement*

La cuirasse supérieure s'est formée dans la partie supérieure en place des matériaux et à la base du solum légèrement remanié. Elle est due à une association intime de l'altération allitique et de la ferritisation en goethite et hématite d'une trame kaolinique aboutissant par toute une succession d'aspects micromorphologiques, pour lesquels interviennent des mécanismes de « décomplexation » et de cristallisation, à l'édification d'une charpente ferrugineuse d'où la phase argileuse est éliminée puis remplacée par des sesquioxydes. La différenciation en horizons est le fait de la combinaison d'un gradient vertical de concentration et de deshydratation des sesquioxydes de fer et d'une tendance à la nodulation à partir de centres privilégiés.

### *Facteurs pédoclimatiques probables*

La constance des caractères en latitude et sur tous les substrats, les affinités ferrallitiques d'ordre structural et chimique indiquent, par opposition aux propriétés équivalentes des cuirasses plus tardives, un pédoclimat plus humide qu'aucun de ceux qui suivront. En particulier les différences profondes avec les cuirasses ferrugineuses Quaternaires traitées au chapitre suivant mettent un doute sur le lessivage oblique ou per descensum comme mécanisme de l'accumulation absolue des sesquioxydes de fer. Reste la migration per ascensum aux dépens d'une nappe phréatique générale, très plausible sur ces immenses étendues planes avant qu'elles ne fussent entaillées. Des traces plus tardives de cette dernière seraient les dépôts cristallisés de goethite et de silice de la base de la formation, l'érosion endogée et la suffosion.

Quel qu'il fut l'extension de ce pédoclimat fut d'ordre continental puisqu'il produisit la même cuirasse jusqu'au Sénégal (site de TILÉ-BOUBAKAR, in MICHEL, 1959). Son expression fut largement favorisée au Niger par de vastes structures horizontales héritées en grande partie des bassins sédimentaires et de leurs bordures.

### *Les sols ferrugineux de la vieille surface cuirassée*

#### LES SOLS DE L'ENTABLEMENT DES GRÈS

Le matériel meuble et peu épais qui recouvre les plateaux est un sable argileux à graviers de grès et de cuirasse, autochtone dans sa masse, né de l'arasement inégal de la dalle ferrugineuse, d'une génération ancienne de sols ferrugineux lessivés à concrétions et cuirasse sur les grès mis à nu actuellement réduits à des restes d'horizons B t Fe cn, d'une reprise du tout dans un reg désertique, finalement d'une désagrégation biologique du substratum. Il possède les caractères de désaturation et d'instabilité structurale des matériaux kaoliniques du Niger, eux-mêmes liés à une végétation et à des sols spécifiques et monotones.

Les déficiences hydriques héritées du mode de mise en place, les carences chimiques héritées de la roche sont à l'origine d'une végétation très spécialisée, une

\* brousse à Combrétacées contractée en brousse tigrée, latitudinalement uniforme. L'existence des bandes arbustives et des sols relativement évolués qu'elles recouvrent est réciproquement conditionnée par la porosité et par la correction superficielle des déficiences minérales. Inversement les sols figés ou involués des bandes nues empêchent l'installation de la végétation par leur imperméabilité, leur compacité, leur pauvreté.

Les processus pédologiques sont communs aux séquences à matériel kaolinique désaturé : éluviation de surface, lessivage et illuviation de fer et d'argile, rubéfaction très modérée, hydromorphie, recyclage biologique des bases. L'ensemble est également peu sensible au gradient latitudinal et produit des sols peu évolués régiques à faciès ferrugineux (A.I-A.2-B/C-R) sous les arbustes, des sols peu évolués hydromorphes (A-Cg) dans les bandes nues méridionales des Sols peu évolués à faciès subaride brun-rouge (A brun-rouge neutre-C) dans les bandes nues septentrionales.

#### LES SOLS DES CRATÈRES ET AUTRES PETITES DÉPRESSIONS

Les séquences des cratères, systèmes clos, sont les mêmes que celles des vallées ouvertes sur le réseau de drainage général, à une érosion moindre près. Ces dépressions sont donc fort anciennes et témoignent de la part prépondérante de la roche-mère dans la pédogenèse. Elles montrent deux ensembles successifs. Le premier, en haut de pente, est formé de sols ferrugineux lessivés à concrétions et cuirasse de lessivage oblique. Le second réunit soit des sols ferrugineux rubéfiés à faible contraste structural (petits cratères à pentes fortes), soit des sols ferrugineux peu rubéfiés, à taches, à contrastes texturaux forts (grands cratères à fond plat). Ce sont des expressions variables des mêmes processus dont l'insensibilité au gradient latitudinal pluviométrique est remarquable.

#### *Conclusions : les variations de la pédogenèse sur la surface supérieure*

La cuirasse supérieure s'est formée dans des conditions pédoclimatiques uniformément humides d'extension continentale. Elle est due à l'altération et à l'apport de solutions ferrugineuses dans une trame kaolinique héritée directement ou indirectement du manteau d'altération Paléocène.

Les sols qui lui ont succédé, directement ou après érosion, sur le même matériau et dans le même paysage, sont des sols ferrugineux à des états de développement divers, les plus anciens cuirassés, les plus récents régiques sur entablement. Leur formation implique une altération plus modérée, le lessivage associé du fer et de l'argile, des remaniements texturaux importants, soit un changement radical du pédoclimat dans le sens de l'assèchement.

L'uniformité dans le temps et dans l'espace de la pédogenèse Quaternaire est caractéristique au Niger des matériaux désaturés kaoliniques. Actuellement il faut les conditions exceptionnelles de régime hydrique très contrasté et d'aridité des bandes nues de la brousse tigrée pour que se forment en milieu sahélien des épipédons, encore tout superficiels, qui ne soient pas de type ferrugineux mais subaride.

## LES CUIRASSES FERRUGINEUSES

### *Les sites*

#### CARACTÈRES GÉNÉRAUX

Les restes de modelés étagés ferritisés ont été conservés en dessous des tables de la surface supérieure. Ces vestiges d'horizons B, kaoliniques et ferrugineux, contiennent un squelette clastique abondant dont l'accumulation aboutit à des cailloutis de terrasses le long des axes fluviatiles. Une érosion prolongée, allant jusqu'à la corrasion éolienne, n'a laissé que des gravillons comme horizons meubles. On tient ces cuirasses pour des reliques de toposéquences à sols ferrugineux lessivés. Elles composent, à l'ouest notamment, un des paysages classiques du cuirassement (Maignen, 1958), auquel s'appliquent bien les règles usuelles d'interprétation des vieilles topographies africaines : parallélisme de l'étagement et du degré d'évolution avec l'âge relatif, alternance de périodes de pédogenèse et d'érosion morphogénétique, succession de pseudo-cycles climatiques (Gavaud, 1970). Appliqués au fait que les cuirasses les plus différenciées sont situées sur les modelés amont, dans les zones méridionales, sur le socle plutôt que sur la couverture ces schémas indiquent que le cuirassement a continuellement décliné dans le temps parallèlement à la pluviosité des phases climatiques humides ce qui lui a valu d'être sensible à la zonalité et à la lithologie.

#### RÉPARTITION RÉGIONALE

Les cuirasses du socle occidental sont étendues, particulièrement sur les schistes birrimiens où elles couvrent 50 % de la surface totale. Elles définissent les ensembles topo-chronologiques de référence :

— le haut modelé réunit des cuirasses épaisses et bien cimentées sur le manteau kaolinique ou ses équivalents schisteux (M.I). Il est formé de glacis adossés à des buttes-témoins Pliocènes ou à des inselbergs, de lambeaux monoclinaux isolés, de cuvettes et autres dépressions perchées par inversion topographique, de chapes

cimentant des éboulis. Il est pédologiquement homogène mais se subdivise localement en deux sous-ensembles topographiques M. 1a et M. 1b (inférieur).

— le bas-modelé (M. 2) porte des cuirasses moins épaisses passant facilement à des horizons concrétionnés. Il est formé de glacis encore fonctionnels recoupant les précédents. Ils forment l'essentiel du paysage à plus de 750 mm de pluies. Au nord de cette limite ils se rétractent vers le sommet des interfluves en laissant la place aux glacis « nus », non ou peu concrétionnés, d'un second type de bas-modelé (M. 3) établi au niveau du front d'altération.

Les cuirasses du socle oriental assimilées au modelé M. 1 se réduisent à quelques conglomérats perchés ; leur localisation plus étroite est attribuée à une tendance zonale vers l'aridité. Au-dessous des glacis concrétionnés s'achèvent et se prolongent par une cuirasse de lessivage oblique assez épaisse dont la base est située à une cote remarquablement constante de 400-420 m, limite de la cuvette tchadienne. Cette auréole isohypse se prolonge au travers de la Nigeria jusqu'au Cameroun et au Tchad (GAUVAUD, 1968). Dominant de peu les glacis nus et renfermant déjà des argiles gonflantes elle est attribuée au modelé M. 2, avec un faciès particulier dû à un niveau statique phréatique et/ou lacustre.

Les bas-modelés M. 3 dominent sur les roches tendres secondaires (argilites et grès) et tertiaires (argilites Ct. 2). Les buttes M. 1 sont localisées au sud et les glacis concrétionnés M. 2 ne dépassent pas 550 mm vers le nord sur le continental Hamadien.

Les thalwegs des vallées creusées dans les grès tertiaires du Niger central et occidental sont restés stables dans le temps. Les versants ne montrent que deux formes successives. La base du versant supérieur est cuirassée, conglomératique au nord (Ct. 1 de l'Ader Douchi), largement bowalisée au sud surtout au niveau de la base de la formation gréseuse (parc du W). Elle est homologue de M. 1 alors que le versant inférieur, non cuirassé et rarement concrétionné, est l'équivalent de l'ensemble des bas-modelés du socle (M. 2-3).

### *Caractéristiques des cuirasses*

#### MORPHOLOGIE

Le squelette est abondant, fait de lithoreliques siliceuses et ferrugineuses et de pédoreliques ferrugineuses héritées des cuirasses sus-jacentes, particulièrement de la cuirasse Pliocène. Il s'agit d'une véritable concentration grossière, due à une éluviation différentielle compliquée de transports, continue sur chaque forme et y prenant divers aspects : éboulis, pavages résiduels, épandages, cailloutis fluviaux.

Les ciments ferrugineux, rouges et bruns, sont moins colorés et plus foncés vers les points bas aussi bien d'un modelé à l'autre qu'à l'intérieur d'une même forme. Cette tendance culmine dans les cuirasses manganésifères de la base des glacis M. 2. Ils procèdent de la ferritisation d'une matrice sablo-argileuse à argilo-sableuse. Une phase plus tardive consiste en enduits ferrugineux cutaniques jaunâtres enrobant squelette et nodules. Craquelée et recimentée, elle témoigne de variations pédo-climatiques importantes. Dans la porosité grossière une circulation finale et parfois toujours active est attestée par des enduits argileux, de quartz pulvérulent très fin, parfois de calcaire (M. 2 sur socle).

Les structures sont massives, pisolitiques ou feuilletées. Ces dernières sont caractéristiques et procèdent des deux autres par développement des vides, alvéoles ou espaces internodulaires, selon des plans grossièrement parallèles et subhorizontaux. Les pisolites sont plus irrégulières que celles de la cuirasse supérieure et se forment par ferritisation d'agrégats polyédriques dont ils peuvent conserver le débit. Des volumes nodulaires se forment au sein même de grès en quantités parfois considérables.

Les horizons sont peu nombreux et essentiellement structuraux : massifs (M. 1), pisolitiques à base feuilletée (M. 1-2), massifs à base nodulaire (grès)... L'épaisseur indurée décroît vers les modelés les plus bas, ex (schistes Birrimiens) : 3-5 m pour M.Ia, 0,5-3,5 m pour M.Ib, 0,5 m pour M. 2.

### MICROMORPHOLOGIE

Le squelette quartzeux est généralement abondant, esquilleux à anguleux avec des formes plus arrondies sur les grès. Il n'est que rarement carié in situ, ce qui démontre que la concomitance de l'altération des quartz et de la ferritisation n'implique pas de liaison effective entre les deux processus. La distribution et l'orientation inégales des grains ont été produits par une pédoturbation antérieure en grande partie au cuirassement.

L'organisation et la filiation des plasma les plus importantes sont voisines de celles de la cuirasse supérieure, mais leur expression est moins claire. Dans la première série (kaolinite, goethite, hématite, cf. p. 30) la ferritisation n'est que rarement guidée par un réseau régulier de séparations plasmiques (M. 1a, sur schistes) mais par une trame plus irrégulière de faces de micropeds centrés sur des quartz, de micro-fissures, de surfaces de séparation de phases granulométriques, correspondant macroscopiquement à la structure « polyédrique ». La « décomplexation », la cristallisation, la surcharge finale en hématite sont moins intenses que dans la cuirasse supérieure, le stade à plasma lacuneux dominant largement dans les lames, le stade à plasma compact restant rare. Les plasmas à goethite bien cristallisée, à silice calcédonieuse, à oxydes de manganèse sont présents en petites quantités. Ces derniers forment une phase tardive insinuée dans les fractures et les vides structuraux, associée à des volumes kaoliniques incolores déferritisés indiquant des conditions localement réductrices lors de leur mise en place.

Les nodules sont des polyèdres curvilignes relativement peu différenciés par rapport à la matrice, à plasma lacuneux ou cloisonné plus dense au centre, limités par des cutines et des néo-matrides. Des volumes nodulaires de formes irrégulières et à limites très diffuses sont communs. Les cutines des nodules et des macro-vides associés à la macro-structure feuilletée appartiennent à une phase très abondante et très caractéristique de ces cuirasses. Elles sont formées de couches alternantes, les unes brunes, argilo-ferrugineuses, isotiques, dépourvues de quartz, très épaisses (jusqu'à 1 mm), les autres jaunes isotiques, à quartz nombreux et fins, peu épaisses, complétées de halos et de digitations goethitiques omniseptiques. Des isotubules porphyrosquelettiques et des strio-tubules goethitiques et siliceuses ont été également observées.

Nodules et cutines brunes sont présents partout, seul leur développement relatif produisant les horizons pisolitiques et feuilletés. La cohésion est directement liée au degré d'évolution des plasma. Elle est forte si les plasma denses sont

abondants, elle est plus faible si le développement moyen s'arrête au stade floconneux ou cloisonné (I, b et c). Elle est également accrue par l'extension des cutines zonées.

## INTERPRÉTATION DES DOSAGES CHIMIQUES

Les cuirasses ferrugineuses renferment 5 à 25 % de quartz, 23 à 40 % de kaolinite, 20 à 50 % de goethite, 0 à 15 % d'hématite, 4 à 6 % de gibbsite virtuelle (non observée), 0 à 11 % de minéraux divers. Les taux de MnO sont faibles (2 %) alors même qu'il est très visible en lames minces.

Par rapport à la cuirasse supérieure les différences sont la richesse en quartz et une déshydratation moindre des sesquioxydes de fer dont 60 % au moins est formé de goethite alors que ce taux minimum s'abaisse à 12 % dans la vieille formation. Le plasma est semblable pour le reste dans les deux ensembles ce qui implique les mêmes mécanismes d'altération et d'accumulation absolue du fer.

## CONCLUSIONS

### *Nature du cuirassement*

Le matériel induré est un horizon de sol préalablement modifié par rapport aux formations sédimentaires ou d'altération par la concentration du squelette et par un développement pédique de type polyédrique sensible aux micro-variations texturales. Les mécanismes essentiels du cuirassement sont dans leur ensemble qualitativement semblables à ceux de la cuirasse supérieure : accumulation absolue de fer dans une trame kaolinique altérée. Cependant les quartz ne sont qu'irrégulièrement dissous, l'organisation micro-structurale est moins régulière, les sesquioxydes de fer se séparent moins bien de l'argile, sont moins cristallisés, déshydratés et concentrés. L'existence et la circulation d'une phase cutanique abondante, amorphe, argilo-ferrugineuse, sont des faits nouveaux ainsi que le développement de « micro-gley » déferritisés à ciments siliceux et manganésifères. A cause de ces translocations originales on peut considérer ces cuirasses comme des horizons B de sols ferrugineux lessivés.

La différenciation en horizons est faible et se limite à un accroissement vers le sommet de la ferritisation et vers la base de la porosité et des cutines liées aux circulations obliques (faciès feuilleté). Les variations dans le développement nodulaire ne sont guère significatives.

Les différences constantes liées au site se résument à la diminution d'épaisseur vers les modelés inférieurs, l'aurole péri-tchadienne faisant exception, à l'accroissement des ciments argilo-ferrugineux amorphes et des oxydes de manganèse vers les bas de pente.

### *Implications pédoclimatiques*

Certains caractères structuraux opposent l'ensemble des cuirasses ferrugineuses à la cuirasse supérieure alors que les propriétés chimiques et la minéralogie montrent davantage de continuité. Comme on ne peut concevoir de passage dans le temps d'un

ensemble à l'autre on attribuera à un changement pédoclimatique radical l'apparition des processus nouveaux : pédoturbation, transport associé et en suspension de l'argile et des sesquioxydes. On peut empiriquement associer ces derniers, sur la base de la géographie des sols qu'ils caractérisent, à des régimes hydriques plus secs et contrastés qu'ils ne l'étaient sur la surface supérieure où tout paraissait procéder de transports en solution. Les cuirasses ferrugineuses différant moins entr'elles que de la cuirasse supérieure on admettra que les variations pédoclimatiques ultérieures n'ont pas eu la même importance. Ces différences internes vont dans le même sens d'une tendance à l'aridité, cette tendance ne pouvant d'ailleurs être dégagée des variations parallèles des autres facteurs de formation dans le temps que par des données externes telles que les caractéristiques des conglomérats.

### *Cailloutis et conglomérats*

#### SITES

Les éléments squelettiques des chaînes de sols des glacis et versants sont concentrés et assortis de caractères de tri, d'émoussé, de stratification fluviatiles dans des cailloutis alluviaux transformés par la même évolution pédologique d'ensemble que les cuirasses ferrugineuses en conglomérats indurés. Ils apparaissent en affleurements linéaires découpés en terrasses étagées le long des vallées actives ou sèches, se raccordant topographiquement aux différents modelés avec les mêmes variations relatives du cuirassement :

— terrasses hautes à cuirasses épaisses, correspondant aux modelés M. 1, parfois subdivisées comme ce dernier en deux sous-ensembles topographiques (vallée du Niger).

— terrasses basses dont le cuirassement plus modéré tend à disparaître vers les régions septentrionales sèches (M. 2 et M. 3).

Il existe dans les grandes vallées (Niger, Mekrou) une formation non indurée de « graviers sous berges » (VOGT, 1959) tapissant une entaille de la basse terrasse et fossilisée par des remblais inactuels et par des alluvions modernes.

Autour de Maradi des alluvions à galets de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur se sont mises en place sur plusieurs centaines de kilomètres carrés. Entaillées par des glacis à cuirasses de type M. 1 et M. 2 elles sont attribuées à un Quaternaire très ancien.

#### CARACTÉRISTIQUES

L'épaisseur des alluvions décroît des hautes terrasses vers les basses terrasses (d'une dizaine de mètres à quelques décimètres), du socle vers les formations sédimentaires où la fourniture en débris est plus faible. Les premières contiennent uniquement des galets de roches très dures siliceuses ou ferrugineuses, nettement émoussés, dans une matrice à kaolinite et sesquioxydes de fer. Des apports graveleux locaux de roches et pédoreliques variées s'ajoutent à ces éléments très évolués dans les basses terrasses.

La masse des cailloutis a été transformée par l'action de la nappe sous-alluviale. Dans les dépôts les plus anciens et les plus méridionaux on observe surtout des apports et des ségrégations ferrugineuses. Les plus remarquables sont les accumulations en bandes à goëthite et silice des alluvions de Maradi. Une pédogenèse toute différente est indiquée par les carbonates de calcium et de sodium des cailloutis de basses terrasses coiffant le socle arénisé (M. 3).

Les cuirasses des terrasses ont la même minéralogie et la même structure que celles des versants et glacis, le squelette seul différant. La plupart ont été le réceptacle des solutions de la chaîne ; quelques-unes sont des horizons B de sols ferrugineux lessivés. L'intensité du cuirassement varie parallèlement sur les terrasses et les glacis associés.

## CONCLUSIONS

La formation de cailloutis reste une énigme dans le milieu inter-tropical Ouest-Africain, même dans ses variantes les plus sèches, où il ne s'en forme plus guère, surtout d'un type aussi évolué que celui des hautes-terrasses. Il paraît possible toutefois d'expliquer les variations parallèles des caractéristiques sédimentologiques et pédologiques indépendamment d'une définition très précise des climats. La diminution dans le temps de la puissance et de l'évolution sédimentologique des cailloutis suggère une réduction de l'hydraulicité. La disparition progressive des cuirasses et l'apparition de pédogenèse de milieu confiné indiquent un assèchement du pédoclimat. La même tendance longue vers l'aridité est inscrite dans les phases morphogéniques et pédogéniques successives.

### *Les horizons meubles relictuels*

#### QUELQUES FACTEURS D'ÉVOLUTION ACTUELS

Lorsqu'ils sont peu disséqués les sols indurés ont conservé des restes de couverture meuble, généralement gravillonnaire, toujours à matrice kaolinique et ferrugineuse. Les caractères pédologiques en sont peu variables, bien que la pluviosité varie de 400 mm à plus de 875 mm. Peu perméables et à réserves en eau faibles ils ont un régime hydrique très contrasté, avec des sites hydromorphes à la base des séquences et/ou des profils. Leur végétation appartient aux stocks banaux des sols acides (p. 18) : savanes boisées à Bombax et Anogeissus au sud, steppes à Commiphora au nord. Elle montre diverses adaptations physiologiques à la présence d'horizons indurés (contraction en gros buissons), à l'hydromorphie (prairies de mares temporaires sur cuirasse).

#### TRANSFORMATION DE SOLS INDURÉS EN SOLS SQUELETTIQUES

Les horizons meubles des sols indurés sont rarement conservés et ne dépassent pas une cinquantaine de centimètres. L'épipédon (A. 1-A. 2) est gris, peu organique (moins de 2 %), sableux, massif, superficiellement compact et imperméable. Lui font

suite des horizons B t Fe rouges ou jaunes selon leur drainage, sablo-argileux à argilo-sableux, polyédriques. A leur base des nodules sont formés par ferritisation d'agrégats compacts souvent gleyfiés ; ils donnent la cuirasse par coalescence. Cette superposition et l'instabilité structurale prononcée de tous les horizons ne sont pas favorables à l'infiltration et expliquent probablement l'érosion aréolaire liée au ruissellement dont ces sols manifestent toujours l'effet. Le départ des fines, insuffisamment compensé par les remontées biologiques, accentue le contraste textural. L'ablation superficielle est suivie d'un abaissement du contact A/B, où l'« invasion » du matériel coloré, porphyrosquelettique ou intertextique du B par les structures beiges agglomératives ou granulaires, très poreuses, du A. 2 est fort visible. Sans être tronqué le profil maigrit constamment sans que s'interrompent les processus de lessivage, d'illuviation et d'hydromorphie. Il finit par s'établir au niveau des horizons concrétionnés, en conservant la même succession d'horizons avec un squelette très grossier formé des anciens nodules, un plasma peu abondant agglomératif (A) ou cutanique (B).

Il existe dans la nature actuelle une évolution continue des sols indurés en sols squelettiques. Cette transformation a dans le passé été considérablement accentuée dans les aires désertiques ou péri-désertiques : la matrice fine a disparu des horizons concrétionnés, souvent des sables éoliens l'ont remplacée, le squelette a été redistribué en reg à surface très plane. Il est vraisemblable que la dénudation des sols indurés du Niger a été acquise ou parachevée dès les périodes arides anciennes.

### *Conclusions*

#### LES VARIATIONS DE LA PÉDOGENÈSE SUR LES MODELÉS À SOLS FERRUGINEUX LESSIVÉS INDURÉS OU CONCRÉTIONNÉS

La pédogenèse est dominée par une forte mobilité d'un plasma à kaolinite et sesquioxydes de fer par rapport à un squelette quartzéux. L'induration des horizons illuviaux est le résultat de l'accumulation des sesquioxydes et de leur organisation en une charpente dont le dessin est largement guidé par des traits structuraux dus à la pédoturbation, à la circulation d'une phase argilo-ferrugineuse. L'altération des quartz n'est que rarement associée à la ferritisation, alors que les manifestations de l'hydromorphie sont communes.

L'amaigrissement progressif du profil entre dans l'évolution normale de ces sols dont les horizons supérieurs sableux livrent un matériel de choix à l'érosion. Il aboutit à la dénudation des horizons indurés ou concrétionnés au travers desquels la pédogenèse, ralentie sans être stoppée, se poursuit.

L'ablation totale des cuirasses paraît cependant s'être produite lors de crises d'érosion accélérée rajeunissant tout le modelé. La nature kaolinique du matériel ainsi exhumé explique que l'évolution en sols ferrugineux se soit longuement poursuivie car au Niger cette pédogenèse est strictement associée à cette minéralogie dans une large gamme climatique (400 mm à plus de 875 mm). L'apparition d'argiles gonflantes sur de vastes parties du bas-modelé (M. 3) a finalement fait disparaître les sols ferrugineux lessivés indurés ou concrétionnés.

Si le socle a conservé de ces alternances de pédogenèse et de morphogenèse deux à trois paliers ferritisés (M. 1a, M. 1b, M. 2), les grès Tertiaires (Ct. 3) n'en

montrent qu'un seul, à la base du versant supérieur (M. 1). Il reste cependant admis que leur déterminisme est essentiellement climatique. Les périodes d'érosion correspondraient à des phases plus sèches car les plus récentes d'entr'elles ont été de type désertique, les types climatiques restant toutefois énigmatiques. Pour les phases pédogénétiques les climats intertropicaux à saison sèche unique pourraient convenir puisque des sols ferrugineux se forment ou paraissent actuellement stables entre 400 mm et 1 500 mm de pluies. La décroissance parallèle du cuirassement, de la puissance et de l'évolution des cailloutis traduirait l'enregistrement par les pointes arides et humides de ces pseudo-cycles d'une même tendance longue à l'aridité.

## LES TOPOSÉQUENCES NON INDURÉES SUR MATÉRIAUX KAOLINIQUES SOLS FERRUGINEUX LESSIVÉS OU APPAUVRIS

### *Facteurs de formation*

#### SITES ET MATÉRIAUX

Les sols les plus récents qui se soient formés postérieurement aux sols ferrugineux et/ou fortement concrétionnés sur des matériaux kaoliniques sont génétiquement apparentés mais moins différenciés que ces derniers. Ils évoluent sur des produits plus ou moins directs de l'altération des granites ou de la délapidification des grès : arènes, kaolins, argiles sableuses, restes d'horizon BC ferrugineux anciens, colluvions remaniant les altérites. Leurs caractéristiques varient peu en latitude bien que ces sols touchent à des sols subarides au nord et à des sols ferrallitiques au sud. Ils s'étendent plus loin vers le nord sur les grès dont ils héritent les argiles que sur le socle d'où une altération à argiles gonflantes finit par les éliminer en zone sahélienne. Leur mode de développement, subordonné à la présence de kaolinite, s'accommode de climats plus secs que la kaolinisation proprement dite.

La plupart sont situés sur des bas-glacis (M. 3) du socle du Niger occidental et central, des argilites et grès du Continental Hamadien et Terminal (Ct. 2), sur le bas-versant (M. 2-3) et une partie du haut-versant (M. 1) des grès Tertiaires (Ct. 3), exception sur laquelle nous reviendrons. Quelques-uns sont situés sur des modelés encore plus juvéniles tels que le remblai supérieur du Niger dans certaines régions (SYA) ou les barres quartzitiques du parc du W.

Les pentes sont faibles et régulières (0,15-2 %) et le drainage externe est généralement assuré. Le drainage interne est médiocre et ne s'améliore qu'au voisinage des reliefs résiduels ou sur les versants gréseux (Ct. 3). L'engorgement par une nappe phréatique, parfois inactuel, est limité à quelques fonds de vallées.

#### PLUVIOSITÉ ET FACTEURS BIOTIQUES

Les sols ferrugineux de cet ensemble ont été observés sur toute l'étendue du Niger méridional, entre 350 et près de 900 mm de pluies. Leur végétation est encore une partie du stock banal des sols acides. Elle est formée d'une strate arbustive ou

buissonnante relativement dense, tendant à se contracter vers le nord, surcimée par une strate arborée vers le sud. La plupart des glacis sont ainsi recouverts de la brousse banale à Combrétacées et *Acacia lianescents*, localement disposée en bandes (Ct. 2) ou en anneaux (grès hamadiens). Les savanes boisées à *Anogeissus* se limitent aux points bas des séquences méridionales.

### *Caractéristiques des sols*

#### LA TOPOSÉQUENCE DE BASE

Les divers types de sols ferrugineux appartenant à cet ensemble se répartissent plutôt en toposéquences à termes indépendants qu'en chaînes véritables. Ils se succèdent en effet dans un ordre constant mais dans des proportions extrêmement variables, allant jusqu'à la disparition de certains types, mais définies pour un type de matériau et de modelé. Il est ainsi possible de les réunir dans une toposéquence compréhensive idéale dont les divers termes sont inégalement représentés dans chaque petit paysage selon des facteurs locaux. Cette suite réunit :

- des sols rubéfiés pauvres en concentrations ferrugineuses en haut de pente.
- des sols à horizons B peu colorés, à taches et concrétions sur les pentes.
- des sols hydromorphes acides, le plus souvent lessivés, dans les points bas.

Le premier type de sols domine sur les grès continentaux, le second sur les granites et les argiles continentales, le troisième sur le continental hamadien.

#### LES PROFILS DE BASE

##### *Organisation morphologique*

La plus commune correspond au terme moyen de la toposéquence idéale :

A. 1 - A. 2 - B. 1 (couleur) - B. 2 (taches et concrétions) - BC - C ou R. Les limites entre horizons sont généralement nettes : A. 1 sombre et compact/A. 2 très poreux, A. 2/B. 1 coloré et polyédrique.

##### *Profils texturaux*

Les taux minima d'argile sont en A. 1, parfois en A. 2. Les taux maxima sont à la base même du profil, rarement en B. 2 bien que les traits cutaniques illuviaux y soient fréquents et que le développement pédique y soit maximum. Les valeurs n'excèdent que rarement 35 % et sont proches de celles du matériau. Les rapports de ce maximum (B. 2 ou BC) sont de 2,1 à 5,1 (médiane 3,5) avec les taux en A. 1, de 0,8 à 1,4 avec les taux en C. L'éluviation de l'argile hors des horizons A ou hors de l'ensemble du profil est plus importante que l'illuviation dans les horizons B. Il arrive également que l'illuviation maximum se fasse au contact même de la roche altérée (grès-quartzites voltaïens). Limons et sables fins peuvent également migrer et former des revêtements dans les horizons A. 2 et B. 1 des sols les plus squelettiques.

### *Profils des sesquioxydes de fer*

Les variations des sesquioxydes (fer « libre » et fer « total ») sont grossièrement parallèles à celles de l'argile à la migration de laquelle ils sont associés. La nodulation ferrugineuse croît dans le profil parallèlement à la compacité. Aux stades réalisés dans cet ensemble elle n'est pas liée à un enrichissement en fer par rapport aux horizons homogènes, en valeur absolue ou relativement à l'argile (Fe 203 total/argile -8-13 %). Ce n'est qu'une réorganisation interne où volumes ferritisés et déferritisés se compensent. L'enrichissement en fer ne se produit largement que dans les séquences plus évoluées à termes indurés.

### *Profils des pH et des bases échangeables*

La plupart des matériaux sont désaturés et très pauvres en bases échangeables. La répartition verticale de ces dernières et des grandeurs associées est alors fonction du profil textural et de la concentration superficielle des cations par la végétation. L'horizon le plus dépourvu est alors souvent le A. 2 ; le plus riche est l'horizon A. 1 sur les matériaux les plus pauvres (grès-quartzites), l'horizon B. 2 sur les matériaux les plus riches (kaolins). Les pH les plus élevés ont été observés sous savane boisée où ils atteignent exceptionnellement 7, les plus faibles sur des sols nus et tronqués sahéliens où ils descendent à 4,3. Ils sont uniformément bas en profondeur :

#### *pH*

horizon A. 1 : 4,5 - 5,5 - 7 (extrêmes et médianes)

horizon B. 2 : 4,2 - 5,0 - 5,9

horizon C : 4,4 - 5,2 - 6,0

#### *saturation (%)*

horizon A. 1 : 29 - 55 - 89

horizon A. 2 : 26 - 42 - 80 exceptionnellement : 9 sur Voltaïen

horizon C : 31 - 47 - 63.

Les grès du Continental Hamadien sont plus riches en bases et ne sont plus purement kaoliniques. Les séquences de sols s'y écartent de la norme (cf. infra) et les bases se concentrent à la base des sols et de la chaîne. On constate que la répartition des cations dans les sols lessivés est une fonction de plusieurs mécanismes antagonistes, l'équilibre final dépendant de la richesse globale des sols.

### *Caractéristiques physiques*

La porosité ne dépasse 40 % en volume que dans les horizons A. 2 qui sont un véritable refuge pour la micro-faune, surtout en zone sahélienne. La cimentation des horizons B ne résiste pas à l'humectation. La dispersibilité de l'argile, l'absence d'agrégats stables sont des caractères constants.

### VARIATIONS ASSOCIÉES À CELLES DU DRAINAGE INTERNE

#### *Accroissement du drainage*

Il apparaît en tête de séquence et se traduit par une rubéfaction prononcée de l'horizon B. 1 qui atteint les rouge-jaune 5 YR et parfois les rouges 2,5 YR sur

certaines matériaux (grès Ct. 3, vieilles lithomarges de cuirasses). Les structures sont plus fines, les nodules disparaissent, le profil tend vers la succession : A. 1 - A. 2 - B (couleur, souvent texture) - BC.

### *Diminution du drainage*

Ses effets apparaissent plus facilement car ils sont la conséquence de l'évolution du type morphologique dominant. La nodulation ferrugineuse elle-même est une conséquence d'un engorgement temporaire et local qui par ailleurs tend à se généraliser vers les bas de pente aux niveaux dont les porosités sont réduites : base de l'horizon B. 2, horizon A. 1, ou qui drainent mal de par leur situation : contact A. 2/ B. Cette hydromorphie produit du pseudogley, des structures prismatiques en surface ; en profondeur on observe du jaunissement, du gley ou du pseudogley, un renforcement du concrétionnement, l'apparition de ciments manganésifères. Elle est plus rarement d'origine externe. Les combinaisons du pseudogley (g) et du gley (G) sont diverses :

- A. 1 - A. 2 - B. 2 g - C, avec disparition de l'horizon coloré B. 1 (Voltaien).
- A. 1 g - A. 2 g - B. 1 - B. 2C (continental Hamadien).
- A. 1 - A. 2 g - B. 2G - BC G (continental Hamadien).

Sur des matériaux plus récents colmatant parfois les points bas des séquences il existe des sols hydromorphes non lessivés acides : Ag - Cg ou AG - CG.

### VARIATIONS ATTRIBUÉES À UNE FORTE ÉLUVIATION LATÉRALE

L'éluviation latérale peut s'accroître à la base de l'horizon A. 2, parfois dans certains niveaux des horizons B. Elle y concentre des éléments squelettiques grossiers et produit des sols très lessivés et décolorés à profils A. 1 - A. 2 - AB à concrétions - C ou A. 1 - A. 2 grossier - C.

On attribue à un semblable mécanisme l'origine première des horizons à squelette plus grossier situés à la base de la plupart des sols ferrugineux lessivés. Il fixe le concrétionnement et limite ainsi l'approfondissement du profil, qui se situe entre 120 et 200 cm sur les argiles gréseuses et entre 45 et 150 cm seulement sur les granites où la fourniture de débris résistants est plus forte.

### CARACTÉRISTIQUES INFLUENCÉES PAR LE GRADIENT LATITUDINAL

On attribue à la diminution de la pluviosité :

— la réduction d'épaisseur des horizons A et B qui du sud au nord passent respectivement de 70 cm à 45 cm (valeurs médianes) et de 120 cm à 45 cm.

— l'apparition de sols bruns, néanmoins toujours lessivés et acides, en sites sahéliens mal drainés.

— la diminution des taux de matière organique et des rapports C/N qui, respectivement inférieurs à 0,30 % et à 12 à moins de 450 mm de pluies, atteignent 1 % et 15 dès 700 mm.

## CARACTÉRISTIQUES SÉDIMENTOLOGIQUES D'ORIGINE PÉDOGÉNÉTIQUE OU HÉRITÉES

La plupart des sols ferrugineux sont nettement plus grossiers en profondeur, cette discontinuité squelettique n'était associée à aucune modification importante du profil. Ces phases graveleuses sont généralement situées au niveau des horizons B à taches ou concrétions ou des horizons C. Elles sont formées des éléments siliceux résistants de l'altérite sous-jacente souvent, mais non obligatoirement, mêlés à des débris allochtones, généralement des gravillons de cuirasses.

On observe actuellement la formation de tels horizons grossiers, parfois par le mécanisme d'éluviation précité, plus souvent à la suite de l'amaigrissement progressif des sols selon les mêmes voies et pour les mêmes causes que dans les sols indurés (p. 42). Cette destruction est particulièrement rapide au nord où elle se complique de ravinements et d'érosion éolienne. Là de petites criques érosives juxtaposent des aires décapées, à « brousse tigrée » sur les anciens horizons B, des surfaces d'accumulation éolienne à « rebdhous » (monticules), des atterrissements d'origine hydrique. Les effets du lessivage et de l'illuviation se manifestent très tôt sur les matériaux remaniés, par des raies dans les sables, par la formation d'un horizon A lessivé dans les matériaux plus argileux.

Dans le passé des mécanismes de même nature mais de plus grande ampleur ont laissé des reliques homologues mais d'un plus grand volume : horizons grossiers remaniés en regs, dunes à sols ferrugineux peu lessivés en continuité stratigraphique avec des sols ferrugineux lessivés plus anciens (Djermaganda). Tout comme sur les modelés indurés une phase climatique particulièrement aride a vigoureusement accéléré les processus normaux de destruction des sols.

### AUTRES SÉQUENCES À SOLS FERRUGINEUX LESSIVÉS

Les sols hydromorphes acides et lessivés sont localement remplacés dans les séquences sur grès crétacés par des sols hydromorphes calcaires à argiles gonflantes, bruns ou jaunes, parfois alcalisés. Ces derniers seraient des sols d'accumulation nés de l'altération de grès plus riches en bases, en minéraux altérables (feldspath) que la moyenne des grès continentaux.

Tout au sud du Niger (GAYA) les termes rubéfiés normaux des toposéquences sur grès tertiaires sont remplacés par des reliques encore épaisses de plus de deux mètres possédant de nombreux caractères de sols ferrallitiques faiblement désaturés : couleur très rouge (10 R), structure polyédrique millimétrique très friable et poreuse, traces de gibbsite « virtuelle ». Ces solum ferrallitiques ont été observés sur toute l'étendue du haut-versant (M. 1), parfois en poches sous-jacentes à la cuirasse, ou au sommet du bas-versant (M. 2). La séquence sol ferrallitique, sol ferrugineux lessivé rubéfié, sol ferrugineux lessivé induré est caractérisée par une forte perméabilité d'ensemble et par une faible mobilité des sesquioxydes de fer. Ce type de différenciation, géographiquement lié au Niger aux grès tertiaires (Ct. 3), explique la faiblesse du cuirassement sur ces formations, notamment dans les hauts-versants.

## Conclusions

### CARACTÈRES GÉNÉRAUX DE LA PÉDOGENÈSE DES SOLS FERRUGINEUX LESSIVÉS

Cette pédogenèse est la conséquence d'une forte mobilité du plasma par rapport au squelette et des sesquioxydes de fer par rapport à l'argile. Elle résulte de la combinaison, plus à l'échelle du profil que de la séquence, de nombreux mécanismes ou processus : lessivage et illuviation de l'argile et du fer, éluviation latérale du plasma et des parties les plus fines du squelette, rubéfaction, nodulation ferrugineuse, hydromorphie et érosion superficielle subordonnées à l'organisation du profil. La circulation des bases vers la partie inférieure des sols et des séquences ne s'exprime que sur les matériaux les moins pauvres ; elle est ordinairement masquée par la circulation liée à la formation de la matière organique.

La dépendance de cette pédogenèse à l'égard de certaines caractéristiques minéralogiques et chimiques des matériaux, kaoliniques et désaturés, lui vaut d'être stable dans le temps et dans l'espace, vis-à-vis des variations pluviométriques notamment.

Cet ensemble modérément différencié permet de relier entr'eux tous les sols sur matériaux kaoliniques du Niger. L'accentuation de la tendance des terres rubéfiées bien drainées à maintenir une forte perméabilité par la formation d'une structure fine aboutit aux sols ferrallitiques de Gaya. Inversement la diminution du drainage interne accroît la nodulation et aboutit au cuirassement.

### L'ÉVOLUTION

La combinaison d'une pédogenèse constante dans son expression morphologique et de processus d'amaigrissement et d'érosion superficielle, normalement lents mais périodiquement accélérés produit des discontinuités dans le squelette de sols dont tous les autres caractères sont en continuité. Des horizons grossiers concentrent des lithoreliques et des pédoreliques, les unes autochtones et dues à l'érosion normale, les autres allochtones et apportées lors des paroxysmes. Leur examen a permis de reconstituer les grandes périodes de la formation des sols ferrugineux lessivés des bas-modelés (M. 3) :

- période principale de pédogenèse et d'érosion normale ; formation de sols ferrugineux lessivés à taches et concrétions dans les horizons grossiers desquels sont inclus des reliques des modelés antérieurs.
- période d'érosion accélérée s'achevant par un épisode franchement désertique ; mise en place de regs sur les horizons grossiers, de proluvions et de dunes formées aux dépens du matériel meuble.
- deuxième période de pédogenèse à sols ferrugineux lessivés (peu lessivés sur les dunes) peut être moins humide que la précédente parce que à moins de 700 mm la nodulation ferrugineuse n'y a été possible qu'en présence d'une nappe phréatique d'origine externe.
- crises érosives mineures, subactuelles et actuelles, déclanchées en région sahélienne, souvent à la suite de défrichements, du fait de déséquilibres entre la végétation et les sols dus à de petites vicissitudes climatiques. Elles produisent sur une échelle très limitée des surfaces d'érosion, des accumulations hydriques et éoliennes. Sur ces dépôts stabilisés se forment actuellement des sols peu évolués (AC), non rubéfiés, dans lesquels apparaissent très tôt les effets du lessivage et de l'illuviation caractéristiques de cette grande famille.

**LES TOPOSÉQUENCES SUR MATÉRIAUX  
À PHYLLITES POTASSIQUES :  
SOLS HYDROMORPHES LESSIVÉS,  
SOLS À GLEY VERTIQUES**

*Facteurs de formation*

SITES ET MATÉRIAUX

Des roches-mères particulières localisent ces sols sur le Nigérien du Niger occidental et sur quelques parties du Birrimien de la même région. Ce sont des schistes et des shales tendres, contenant des phyllites potassiques (muscovite-séricite-illite : 30-50 %), de la kaolinite, des sesquioxydes de fer, du quartz très finement divisé. Les matériaux sont rapidement argileux, avec un squelette limoneux ou très finement sableux. Les capacités d'échange et les taux de sesquioxydes de fer sont médiocres (moins de 8 % de « fer libre » par rapport à l'argile, 5 % en moyenne). La porosité est très faible, ainsi que le pouvoir de gonflement. L'imperméabilité est de règle. Diverses roches siliceuses, en couches ou septa, fournissent les éléments résistants de pavages et d'horizons grossiers, d'extension limitée. Des lentilles calcaires et dolomitiques sont une source de bases possibles pour les sols du Nigérien, modérément désaturés dans leur ensemble.

Le modelé réunit des collines aux versants raides (45 %) issues de la destruction de buttes témoins cuirassées et de très grands glacis (M. 3) aux pentes faibles et régulières (0,2 %). Un chevelu dense et diffus de ravineaux découpe les amonts en buttes à pavage et remblais les avals de produits très fins qui ne prennent d'importance que dans la gigantesque mare du Beli.

PLUVIOSITÉ ET FACTEURS BIOTIQUES

La pluviosité est comprise entre 400 mm et 475 mm. La végétation, de type sahélien, est floristiquement très pauvre et de faible développement. La plus grande partie est formée de brousses arbustives à *Acacia flava* et à *Dichrotrachys*

glomerata, ce dernier en peuplements monospécifiques énormes. Il n'y a pratiquement pas de cultures en dehors des bords de mare. Le paysage végétal, aussi misérable et revêche que celui de friches usées, est cependant le climax de sols arides et infertiles.

## *Les sols*

### CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES SÉQUENCES

Le développement pédologique est très médiocre en dehors des aires d'accumulation colluviales ou alluviales. Il est caractérisé par une hydromorphie généralisée, secondairement par des traits de sols lessivés, ferrugineux, vertiques.

Les collines et les amonts à bon drainage externe portent des sols minéraux bruts (Cg - R) puis des sols peu évolués hydromorphes (Ag - Cg - R). Des sols à pseudogley, parfois lessivés et à horizons B rubéfiés (Ag - (B) ou Bg - Cg), des sols à gley de surface vertiques à nodules calcaires (Ag - (B)g - (B)g ca vertique) s'organisent en toposéquence sur les remblais alluviaux.

Le mauvais drainage interne, les taux médiocres de sesquioxydes de fer produisent des teintes blafardes grises ou blanches, exceptionnellement des couleurs brunes ou jaunes. Les textures sont toujours très fines, parfois limoneuses. Le développement pédique est important, avec des formes à faces très planes de petites dimensions, presque invariablement reprises dans une sur-structure prismatique : les horizons A sont massifs ou prismatiques selon leurs structures, les structures des horizons (B) sont polyédriques ou cubiques avec sur-structures prismatique, des faces de glissement peuvent apparaître en profondeur, les taux élevés d'argile compensant la faiblesse des capacités d'échange spécifiques. Les hydroxydes de fer se séparent et se concentrent en taches (nodules tendres) dès le sommet de l'horizon d'altération des sols minéraux bruts mais le cuirassement de cette formation a été faible dans le passé et pratiquement nul sur les modelés récents. Les oxydes de manganèse s'individualisent fréquemment dans la roche altérée. Les nodules calcaires ne se forment que dans les plus grandes dépressions.

### RECONSTITUTION DE LA PÉDOGENÈSE

Les roches micacées qui, formées de minéraux stables, ne peuvent être altérées que par fragmentation mécanique, ne le sont que difficilement, lentement parce que le matériau produit est un support médiocre de la végétation du fait de sa compacité, qu'ainsi découvert il est déblayé par le ruissellement intense que permet sa forte imperméabilité. L'hydromorphie pétrographique s'y manifeste dans les taux et dans la répartition de la matière organique, dans la distribution des sesquioxydes de fer, dans la structure où dominent les formes de retrait dont l'aspect spécial est l'effet de la richesse en limons. Les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse ne sont immobilisés qu'au sommet de la roche altérée, site d'engorgement prononcé. Ce défaut de fixation du fer, qui se traduit par l'absence de cuirasses modernes et par la

rareté des cuirasses anciennes, est attribué au manque d'affinité des micas pour ses composés. Les bases sont superficiellement lessivées et se concentrent dans les grandes dépressions fermées où leur véhicule est la nappe sous-alluviale. Là des dépôts de carbonate de calcium, peut être un début de simatisation, s'opèrent au sein de dépôts argileux qui, débarrassés par décantation d'une partie des sables fins et des limons, peuvent acquérir des structures vertiques. Du fait de l'acidification organique cette transformation est incompatible avec la gleyfication prononcée de la partie supérieure des sols les plus longuement engorgés. On observe en effet au centre des flats alluviaux la désaturation des horizons à gley, leur décalcification, la diminution de la capacité d'échange de leur argile, la régression des structures vertiques et l'effacement du micro-relief.

Une évolution en sols ferrugineux se manifeste localement par des horizons A éluviaux et par des horizons B rubéfiés ou à taches formées par ferritisation d'agrégats. Elle reste accompagnée d'hydromorphie et ne s'exprime que dans les parties les plus anciennes des remblais en bordure des grandes dépressions.

## *Conclusions*

### AFFINITÉS DES SÉQUENCES À SOLS HYDROMORPHES LESSIVÉS

Leur ressemblance avec des sols ferrugineux lessivés tient à ce qu'une partie des processus d'évolution leur est commune mais avec des intensités et des relations différentes : l'hydromorphie y est plus forte, primaire et non plus secondaire ; le lessivage du fer et de l'argile y est moins prononcé ; le concrétionnement ferrugineux est pratiquement limité aux horizons C ; l'érosion enfin y est plus forte parce que plus précoce et subordonnée moins à l'organisation du profil qu'aux propriétés du matériau.

Le lessivage très prononcé des bases, l'apparition de termes illuviaux à argiles 2/1 et à carbonates apparentent également ces séquences aux chaînes à sols ferrugineux, solonetziques et vertiques étudiées dans le chapitre suivant. La différence est que cette transformation des sols de bas de pente n'existe qu'en des sites alluviaux privilégiés par la topographie.

### ÉVOLUTION DANS LE TEMPS

Les glacis du Nigérien sont en continuité topographique avec le bas-modélé (M. 3) du Birrimien et du Continental Terminal (Ct. 2). Il est donc infiniment probable qu'ils ont subi les mêmes vicissitudes pédo-climatiques dont témoignent les quelques dunes fixées qui le parsèment. Faute de restes suffisants d'horizons grossiers et/ou concrétionnés il n'est toutefois pas possible d'y retracer l'histoire des sols avec autant de détails. La rareté même de ces témoins est un indice que les sols anciens étaient également caractérisés par une érodibilité élevée et par un concrétionnement peu abondant et devaient composer un paysage pas très différent de l'actuel.

## LES TOPOSÉQUENCES À SOLS HALOMORPHES À STRUCTURE DÉGRADÉE, SUR MATÉRIAUX À ARGILES GONFLANTES ALCALISÉES

### *Facteurs de formation*

#### SITUATION ET ROCHES MÈRES

Ce paysage est établi sur des bas-glacis (M. 3) partiellement couverts d'une altération à argiles gonflantes localement alcalisée. Il n'a été observé que sur des roches feldspathiques alcalines ou calco-alcalines. Il s'étend sur des panneaux de plusieurs centaines de kilomètres carrés sur les granites du Niger occidental (Liptako), sur des surfaces plus limitées aux pieds des inselbergs du Niger oriental (Mounio) ou en enclaves isolées sur certains grès continentaux crétacés.

#### MATÉRIAUX

##### *L'argile d'altération*

Elle est l'élément caractéristique des sites les moins bien drainés d'une association d'altération dont l'autre pôle est une arène kaolinique qui lui fait pendant à l'échelle de la séquence (Mounio) ou du bassin (Liptako). La roche blanchie à feldspath séricitisée passe en quelques centimètres à une argile sableuse grise ou olivâtre, à nodules calcaires et concrétions manganésifères fréquents, pétrie de quartz et de minéraux altérés. Ce matériel, souvent vertique, forme un écran peu perméable à la base des profils et dans les fissures de la roche. Le plasma est un mélange de kaolinite ou de métahalloysite, de smectites ferrifères ou de montmorillonite héritée, de phyllites potassiques (illite), de petites quantités de goethite. Sur granites calco-alcalins elle provient d'une élimination partielle de la silice et des alcalins, d'une accumulation du calcium dans les carbonates, de magnésium dans les argiles, du fer dans les argiles et sous forme de sesquioxydes, du maintien de l'aluminium.

L'alcalisation locale de ce matériel (pH jusqu'à 9,6, Na/T jusqu'à 40 %) n'est pas due à une accumulation absolue du sodium de la roche dont il ne conserve

qu'environ 15 %, la moitié sous forme échangeable. La richesse relative en sodium par rapport aux alcalino-terreux, caractéristique des roches feldspathiques (oligoclase, andésine) sur lesquelles se forment uniquement ce type de sols halomorphes, paraît au contraire décisive. Il est tel en effet que l'équilibre des cations absorbés, ces derniers étant libérés par l'altération à la même vitesse, fixe le rapport Na/T à 10-20 % alors que la valeur homologue sur des roches plus basiques (bitownite, labrador) ne portant jamais de sols alcalisés est de 6 à 8 %. Cette alcalisation virtuelle ne s'actualise que ponctuellement sous l'effet de la concentration de solutions très diluées de bicarbonates et carbonates. Généralement le lessivage pluvial ne permet le maintien dans le sol que des précipités peu solubles de carbonate de calcium, le carbonate de sodium n'ayant jamais été observé qu'au toit de la nappe alluviale des grandes vallées traversant ces paysages.

### *Relations entre les altérations à kaolinite et à argiles gonflantes*

Selon l'échelle de la comparaison les sites à argiles gonflantes sont, par rapport aux sites à altération kaolinique, moins bien drainés (profil, séquence), plus récents (modèle), moins arrosés (région). Au Niger les smectites sont caractéristiques des bas-modèles (M. 3) et plutôt sahéliennes. Dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest elles peuvent apparaître dès les bas-modèles à sols indurés (M. 2) et sont également largement soudaniennes.

Les relations de voisinage sont fortement dépendantes des héritages. Elles sont de deux types au Niger (cf. p. 27) :

— au Liptako les types d'altération au niveau du bas-modèle sont répartis par bassins plutôt que par séquences, selon l'acquis antérieur. Le contact smectites - kaolinique est local, voire ponctuel.

— au Mounio cortex kaoliniques et argiles gonflantes se succèdent dans une chaîne, la topographie seule étant héritée.

Cette dernière disposition, découverte et analysée au Tchad (Bocquier, 1967), est spécifique des séquences à sols halomorphes dans l'ensemble des séquences à argiles gonflantes.

### *Stratigraphie*

L'altérite, au moins sur les sommets d'interfluves, est couverte ou ravinée par un horizon ou une nappe grossière décimétrique, plus épaisse dans les régions les moins planes (50 à 80 cm). Les éléments en sont autochtones (quartz, gros feldspath, concrétions) et/ou allochtones (gravillons, roches). Dans le bassin du Niger ils passent latéralement à des cailloutis eux-mêmes au niveau des « graviers sous berges » (p. 40). L'évolution de la matrice est en rapport avec sa situation topographique, de type ferrugineux dans les points hauts (concrétionnement), smectitique dans les points bas (nodules calcaires, manganèse), parfois avec superposition tardive du second type sur le premier (Mounio). Le sol meuble évolue au-dessus sur moins d'un mètre de sables argileux, eux-mêmes recouverts d'une concentration squelettique centimétrique née d'une combinaison du ruissellement et du lessivage. Les sables des dunes anciennes recouvrent l'horizon grossier, se substituent parfois à sa matrice, recouvrent ou interpénètrent le matériel meuble sus-jacent.

## MODELÉ

Les glacis du Liptako sont caractéristiques du bas-modelé (M. 3). Le centre des interfluves est légèrement convexe (pentes : 0,5-3 %), dominé par des buttes tabulaires cuirassées, parfois pavé de cuirasses ferrugineuses minces (M. 2). Le ruissellement y est intense, les sols sont minces, la roche affleure en boules ou dômes. Les parties inférieures sont rectilinéaires, à pentes très faibles (0,15 %) sur plusieurs kilomètres. Les sols y sont plus épais et les thalwegs généralement remblayés. L'ensemble est fossilisé ou cloisonné par les dunes anciennes. Dans le Mounio les pentes sont plus brèves et fortes, la situation étant inverse sur les grès.

## FACTEURS BIOTIQUES

La composition floristique de la végétation, où *Acacia seyal* et *Commiphora africana* dominent en tous lieux, sa physionomie de brousse arbustive contractée révèlent la sécheresse édaphique. L'augmentation de la pluviosité, de 400 à 575 mm, transforme les steppes arbustives et les « brousses tigrées » septentrionales en savanes arborées plus hautes et diffuses où apparaissent des espèces plus soudanaises : *Anogeissus leiocarpus*, *Sclerocaya birrea*. Les points bas sont couverts de bois armés. Le tapis graminéen est peu varié. *Cymbopogon schoenanthus* est commun sur les sols alcalisés où il constitue parfois seul les bandes couvertes des brousses tigrées.

La fréquence des cultures est nulle sauf dans le Liptako où elle est de l'ordre de 1/10. La mauvaise conservation, la résistance à la colonisation végétale de ces terroirs n'est pas le fait d'une utilisation mal conduite mais des propriétés physiques des sols : imperméabilité, compacité, finalement sécheresse (p. 10).

## *Caractéristiques des sols*

### TOPOSÉQUENCES ET PROFILS

#### *Toposéquences*

Les parties hautes du modelé, le centre des interfluves portent des sols à horizons A éluviaux, ferrugineux ou solonetziques. Des sols bruns et des sols alcalisés bruns se forment sur les bas de pentes. Les dépressions septentrionales contiennent des vertisols alcalisés, les dépressions méridionales uniquement des sols hydromorphes.

#### *Sols ferrugineux lessivés*

Observés sur tous les matériaux ils se ramènent généralement à la même organisation : A.1 massif - A.2 clair et poreux - Bt coloré à structure polyédrique - II B ox cn r concrétionné et graveleux - III C arénacé. Les translocations au sein des

horizons grossiers sont souvent remarquables et produisent soit des horizons éluviaux E internes soit des accumulations d'argile et de fer en bandes.

Une seconde organisation à la fois plus rare et plus caractéristique de ces séquences a été observée sur les grès : A.1 - A.2 - B coloré - B t g Ca cn - II B ox cn r. Le pseudomycélium calcaire associé au pseudogley traduit l'apparition d'un milieu plus confiné et riche en bases que le solum ferrugineux. Cette combinaison n'est pas fortuite car elle a été régulièrement observée avec des caractères plus affirmés (argiles gonflantes, nodules) du Nigeria au Cameroun (GAVAUD, 1968).

#### *Sols halomorphes à structure dégradée et sols planiques*

Les « solonetz solodisés » (BOCQUIER, 1964) sont les sols les plus caractéristiques mais non les plus communs de cet ensemble :

A.1 gris et massif - A.2 décoloré et poreux - E blanchi centimétrique - contact planique - B à colonnettes à organisation concentrique (néosquelettine, cortex brun-rouge à accumulation ferrugineuse, centre brun à cutanes argileuses) - B sn ca olivâtre, prismatique, alcalisé, à pseudomycélium et nodules calcaires - C ca, situé à moins de 70 cm de profondeur.

Les sols les plus communs sont moins typés : sols à contact planique blanchi mais à horizons B sans structure en colonnettes, sols à contact planique non blanchi et à horizons B avec ou sans colonnettes (solonetz), parfois rubéfiés à leur partie supérieure.

En aval des sols halomorphes ou planiques à horizons A éluviaux se forment des sols bruns, parfois alcalisés, à profils A - (B) ou (B) ca sn - C ou C cn. Leurs teintes sont uniformément foncées, leurs structures généralement polyédriques et compactes. Au voisinage des dunes ils présentent des phases complexes également brunes.

#### *Vertisols alcalisés et sols hydromorphes*

Les vertisols alcalisés sont d'un noir intense (3/O), à profil Ag - (B) vertique sn - (B) ca sn, leur matériel est immédiatement dispersible dans l'eau de pluie et peut se disposer en cutanes argileuses au sommet de l'horizon (B).

Les sols qui les remplacent au sud sont de teintes grises, bariolées par le pseudogley. Les horizons supérieurs sont désaturés et les horizons profonds très faiblement vertiques : Ag - (B)g - (B)g ox cn v - C ox cn.

#### *Synthèse des caractères morphologiques*

Les séquences sont formées d'une majorité de profils A - (B) - C associés à quelques profils A.1 - A.2 - B - C, ces derniers à horizons éluviaux centimétriques donnant parfois lieu à des contacts planiques très blanchis. La massivité et la compacité sur tout ou partie du profil sont caractéristiques. La structure est ordinairement massive en A, polyédrique ou cubique en assemblage compact en B et C, massive à aspect de ciment en C. Les formes vertiques peuvent exister à la base des horizons B et dans les horizons C des sols de glaciais mais sont plus fréquentes dans les flats alluviaux où elles s'accompagnent d'une haute dispersibilité. La structure prismatique se superpose fréquemment à ces types de base. Les colonnes sont plus rares. Les horizons A sont gris ou beiges, les horizons B sont bruns, parfois

légèrement rubéfiés à leur partie supérieure, plus rarement sur toute leur épaisseur. Le pseudogley est commun en surface, au niveau du contact A/B, dans le matériau ou à la base des B, ces derniers sites parfois décolorés ou verdés par le gley et recevant ordinairement les accumulations de carbonates de calcium. Le concrétionnement ferrugineux, modéré, n'est connu que dans les termes rubéfiés.

### *Quelques propriétés chimiques et physiques*

La matière organique est peu abondante, minimum sur l'amont ferrugineux et solonetzique (0,3-1,1 % et C/N de 8-11), maximum sur l'aval vertique (1,0-1,1 % et C/N : 12-13).

Les taux d'argile des horizons B croissent vers l'aval, des sols ferrugineux (15-25 %) aux solonetz (20-35 %) et aux vertisols (50-60 %). Leurs rapports aux taux dans les horizons A varient dans le même sens, étant de 2-6 dans l'amont ferrugineux, de 1,3-9 dans les solonetz, de 1-1,4 dans les sols bruns et les vertisols. L'enrichissement par rapport aux horizons C n'est sensible que dans les deux premiers termes où le rapport B/C est de 1,1-1,3.

Il existe également un gradient descendant des capacités d'échange rapportées à l'argile, les minima se situant dans les horizons A et les sols ferrugineux (20-30 mé.), les maxima étant dans les vertisols et dans les horizons B (25-80 mé.) ou C.

Les sols ferrugineux et les horizons A, à l'exception de ceux des sols à alcali bruns ou vertiques, sont modérément acides et désaturés (pH : 5,7 - 7,5). Les horizons B et C, à l'exception de ceux des sols ferrugineux, sont neutres à alcalins (pH : 6,9 - 9,0).

Sodium et calcium croissent toujours en valeurs relatives et absolues vers la base des sols, le magnésium et surtout le potassium restant constants ou se concentrant en surface. Les taux relatifs (Na/T) de sodium ne définissent aucun seuil en rapport avec les caractéristiques structurales des sols secs. Ils varient de 3 à 14 % dans les horizons à colonnettes, de 1 à 30 % dans les sols bruns, de 15 à 30 % dans les vertisols.

Par contre la perméabilité du sol saturé et la macroporosité du sol ressuyé (PF 3) s'annulent lorsque ce rapport dépasse 14 %. Les caractéristiques physiques sont moyennes dans les sols ferrugineux et bruns non alcalisés, médiocres dans les solonetz et les sols hydromorphes, très mauvaises dans les sols bruns et les vertisols alcalisés.

### *Conclusions*

#### CARACTÈRES GÉNÉRAUX DE LA PÉDOGENÈSE

Il existe une variation parallèle de la minéralogie du plasma minéral et des processus pédogénétiques dans les séquences et dans les profils. Le lessivage, la rubéfaction, le concrétionnement ferrugineux sont propres aux sols kaoliniques sommitaux. En position intermédiaire l'augmentation relative de la kaolinite au sommet des profils est parallèle au lessivage et à l'éluviation latérale. En bas de pente

ou en profondeur des solonetz ou de quelques sols ferrugineux des argiles gonflantes sont affectées de brunissement, de carbonatation, d'alcalisation, de gley ou de pseudogley.

Initialement favorisée par le chimisme de la roche-mère la rétention d'une très petite partie du sodium libéré par l'altération contribue au confinement de la pédogenèse du milieu aval par imperméabilisation. Bien que hautement spécifique de cette partie des séquences la fixation de grandes quantités de sodium échangeable n'y est jamais que sporadique et sans relation directe avec la morphologie : les solonetz, les sols bruns et les vertisols possèdent en effet les mêmes et grands variations du rapport Na/T. Une explication de ce fait universel est que l'expression morphologique de l'halomorphie « survit » à la présence effective des agents salins ou alcalinisants (WHITE, 1964) car elle dépend en premier lieu de la dispersibilité de l'argile (LAKTIONOV, 1961).

Cette répartition synthétique des sols (BOCQUIER, 1967) est modifiée par des facteurs historiques et lithologiques. Les termes ferrugineux sont très largement étendus dans l'ancien domaine d'extension du manteau kaolinique et à la limite méridionale de ces séquences. Inversement lorsque le front d'altération est plus largement découvert, cela se réalisant essentiellement en zone sahélienne, les sols solonetziques et les sols bruns se substituent presque entièrement aux sols ferrugineux, la lithologie intervenant alors pour fixer des nuances du modelé et de la pédogenèse.

Par comparaison avec des territoires où les séquences à sols halomorphes entrent largement dans le domaine soudanien il est possible de recenser les caractères proprement sahéliens des sols Nigériens : taux médiocres de matière organique, extension très grande des faciés « bruns » non lessivés, structures laminaires en surface des sols de glaciais. Ils reflètent la diminution du couvert végétal, du lessivage, l'accroissement du ruissellement dus à l'aridité climatique renforcée par les propriétés physiques des sols.

## EVOLUTION DANS LE TEMPS

Une phase climatique très aride a fortement tronqué une couverture pédologique dont les témoins sont des horizons B de sols ferrugineux lessivés aux niveaux grossiers déjà complexes et de sols bruns à structure dégradée. Ultérieurement l'évolution ferrugineuse associée à une forte érosion superficielle et endogée s'est poursuivie sur les anciens horizons tronqués ou éolisés. Des sols solonetziques les ont remplacés où l'altérite avait été mise à nu, la limite méridionale de ce décapage se situant au Niger vers l'isohyète de 500 mm. Des vertisols alcalisés se sont formés dans des dépôts de barrage dunaire, des sols juvéniles, bruns, lessivés et à raies sur les « voiles éoliens ».

Les sols halomorphes plus épais, les sols bruns à structure dégradée des pentes moyennes ou basses, tous à horizons lessivés minces ou nuls, ont pu traverser de par leur position et leur morphologie moins vulnérable ces vicissitudes climatiques sans trop se modifier.

Actuellement les éléments squelettiques grossiers sont concentrés en surface des sols par une combinaison du lessivage et du ruissellement. L'intensité de l'appauvrissement en plasma minéral résultant est intermédiaire entre celle des toposéquences à sols lessivés kaoliniques et celle des toposéquences à sols non lessivés smectitiques calciques que nous étudierons dans le chapitre suivant.

**LES TOPOSÉQUENCES À SOLS BRUNS  
EUTROPHES ET SUBARIDES À VERTISOLS SUR  
MATÉRIAUX À ARGILES GONFLANTES  
CALCIQUES**

*Facteurs de formation*

SITUATION ET ROCHES-MÈRES

Les argiles gonflantes non alcalisées recouvrent les bas-modelés (M. 3) ou des entailles plus récentes sur roches basiques et sur argilites. Elles ont été observées sur des amphibolites et schistes amphiboliques, sur des gabbros, sur des serpentines du Niger occidental (Birrimien), sur des roches para-métamorphiques calco-magnésiennes du Niger oriental (Sugarien), sur des argilites gypsifères du Niger central et oriental (Crétacé), sur des schistes argileux du Niger sud-occidental (Voltaïen).

MATÉRIAUX

*Les argiles d'altération*

Les roches basiques produisent des argiles sableuses décimétriques grises à brun-olive, vertiques, souvent à nodules calcaires, parfois à cristaux de gypse. La fraction argileuse renferme de 80 à 100 % de feuilletts gonflants de smectites ferrifères anciennement déterminées comme montmorillonite. Elle forme également des cutanes incolores sur les plans de schistosité de la roche altérée. Elle est saturée par du calcium et du magnésium, ce dernier très abondant, le sodium représentant moins de 5 % de la capacité d'échange. Les argiles d'altération sont, à la différence des roches, peu diversifiées et recouvrent presque toujours des faciès « schisteux » et tendres. WACKERMAN (1967) a observé les mêmes faits sur une formation similaire du Sénégal oriental et les explique de façon simple en substituant l'altération au métamorphisme comme facteur principal de différenciation minéralogique. A partir d'un petit nombre de roches basiques (gabbros, grano-diorites) l'altération engendre par degrés :

— des « faciés verts » à chlorites, amphibolites, serpentines, nés dans la zone de céméntation profonde et correspondant aux « roches vertes » schisteuses Birrimiennes.

— des « faciés pélitiques » à vermiculite, séricite, kaolinite, correspondant aux « shales sédimentaires » et au « manteau kaolinique d'altération » du Birrimien.

— finalement les « faciés de troisième degré », à squelette quartzeux et plasma micro-cristallin à montmorillonite, illite, kaolinite, correspondant aux matériaux de sols effectivement observés sur le Birrimien (à sols vertiques, à sols hydromorphes lessivés, à sols ferrugineux lessivés).

Les argilites, à montmorillonite et petites quantités de kaolinite, plus rarement à attapulgite, se délépidifient par fragmentation et gonflement pour donner directement le matériau du sol.

### *Stratigraphie*

La plupart des profils des glacis sur roches basiques montrent une stratigraphie compliquée :

— à la base se situe l'argile d'altération ou directement une « roche verte » schisteuse.

— paraissant raviner l'horizon C un horizon grossier d'environ 50 cm est formé de fragments de roches dures (quartz) ou tendres (schistes), autochtones ou allochtones, de gravillons ferrugineux. La matrice argileuse est elle-même tachée ou riche en concrétions petites et noires (Fe, Mn). Le squelette est parfois vêtu d'épais cortex ferrugineux jaunes craquelés et recimentés.

— en continuité avec la matrice de l'horizon est une argile sableuse, de 25 à 200 cm d'épaisseur, où se différencie le sol.

— des sables éoliens peuvent fossiliser en partie l'argile sableuse, ou se substituer entièrement à elle ainsi qu'à la matrice de l'horizon grossier et concrétionné. Ils ont pu évoluer eux-mêmes en sols ferrugineux peu lessivés bien évolués et rubéfiés.

— en surface est une concentration pelliculaire de sables et de menus débris, rocheux ou gravillonnaires.

Dans les bas-fonds et sur les argilites les sols apparemment en place sont plus fréquents.

### MODELÉ

Sur socle les pentes sont presque nulles à la base des glacis et n'augmentent que très faiblement au centre des interfluves (2-4 ‰). A l'ouest ils sont dominés en amont par le décrochement très léger d'une cuirasse ferrugineuse peu épaisse (M. 2) et passent en aval à un remblai de sables fins rubéfiés. Les glacis sur argilites sont également très peu pentus mais ils peuvent être localement entaillés par des formes à bad-lands où la déclivité varie de 8 à 20 ‰.

### RÉGIMES HYDRIQUES ET FACTEURS BIOTIQUES

Les séquences sont situées entre 250 et 550 mm de pluies, quelques-unes jusqu'à 800 mm. Le ruissellement diffus transforme la surface des glacis en une

mosaïque d'aires d'ablation et d'apport, disposée et fixée en « brousse tigrée » par la végétation sahélienne. Le régime hydrique varie en conséquence rapidement d'un point à l'autre, le sol nu et érodé s'humectant peu et se desséchant vite, le sol couvert pouvant être temporairement et profondément engorgé. Aux variations à courte distance s'ajoute un gradient croissant d'aridité et d'érosion entre la base colmatée et hydromorphe et le sommet érodé et desséché des glacis. Il reste le seul observable à la fois au sud où la végétation est plus diffuse et au nord où elle tend à se cantonner aux thalwegs (Damergou, 250 mm).

Les steppes arbustives et les bois armés à *Acacia* sont caractéristiques de ces sols compacts, à régime hydrique très contrasté, à pH élevés (p. 19). La strate ligneuse s'amenuise fortement en climat sahélo-saharien où subsiste une prairie annuelle courte de graminées xérophiles (*Schoenefeldia*).

Il n'y a de cultures que dans les vallées de l'Ader Douchi où existaient des possibilités d'irrigation naturelle (sorgho et coton) par épandages de crue. Ailleurs le très mauvais équilibre entre une végétation rabougrie et des propriétés physiques de surface médiocres ne doit rien à des excès cultureaux.

### *Caractéristiques des sols*

#### LES PROFILS

##### *Sols bruns eutrophes et sols regiques vertiques*

A plus de 700 mm les amonts sur roches basiques et schistes argileux sont occupés par des sols bruns, texturalement homogènes, finement structurés, épais de quelques décimètres :

A grumeleux à finement polyédrique — (B) polyédrique à cubique — C cn.

Sur argilites, en climat sahélien, les profils sommitaux également bruns et minces diffèrent par l'élargissement des structures qui prennent un aspect vertique (coins à faces de glissement) en profondeur :

A cubique — (B) vertique — BC cs.

##### *Sols brun-rouge de glacis et sols rouges tropicaux*

L'amont des glacis sahéliens sur roches basiques porte des sols texturalement homogènes (au lit ruiselé superficiel près) qui à la limite peuvent ne différer des sols bruns eutrophes que par une rubéfaction modérée de l'horizon (B) mais qui possèdent plus généralement des structures nettement élargies. L'épaisseur meuble au-dessus de l'horizon grossier est ordinairement faible (70 cm) mais peut atteindre exceptionnellement 2 m :

A brun, feuilleté — (B) brun-rouge, cubique (polyédrique) — (B) brun-rouge, (prismatique) polyédrique — II B r cn g — III C cn. Ils ressemblent assez à des sols rouges tropicaux (*Fersiallitiques*) érodés. Cette affinité est confirmée par l'existence dans les remblais situés à la base de certains glacis de profils rubéfiés et lessivés mais néanmoins saturés, avec tous les intermédiaires possibles avec les sols brun-rouge de glacis.

## *Argiles noires*

La base des glacis et les dépressions colmatées, les remblais sablo-argileux partiellement allochtones précités faisant exception, portent des sols argileux foncés (bruns, olive, noir) à structures grossières conformes à la définition des argiles noires de 1962. Leur plasma est vraisemblablement formé de la même phase organominérale (HESS et SCHOEN, 1964) dont les capacités de gonflement et d'orientation s'expriment diversement selon le régime hydrique local :

— les sols bruns tirsifiés succèdent immédiatement sur les pentes aux sols brun-rouge de glacis, dont ils diffèrent surtout par la couleur :

A brun, feuilleté — (B) ou AB, brun, (prismatique) cubique (polyédrique — (B) brun, (prismatique) polyédrique — II B r cn ca g — III C. cn ca.

— ils passent continûment à des vertisols par formation de structures en coins à faces de glissement, élargissement de la structure prismatique, accentuation de la nodulation calcaire, finalement par la formation de micro-relief. Les structures de surface sont le plus souvent larges, sauf sur argilites où elles restent longtemps grumosoliques :

A brun ou gris, grumeleux ou prismatique — (B) brun à brun-olive, vertique — (B) — C. ou II C.

En climat aride (sahélo-saharien) la partie supérieure des vertisols est parfois rubéfiée, par apports ruisselés semble-t-il.

## LES SÉQUENCES

Les séquences dont l'argile est héritée de roches sédimentaires sont moins variées que celles dont l'argile est produite par l'altération des roches basiques.

### *Sur argilites*

pluviosité : 250-400 mm (Damergou)

sols vertiques et vertisols tronqués et rubéfiés.

pluviosité : 350-600 mm (Niger central)

sols regiques vertiques — vertisols grumosoliques — vertisols.

pluviosité : 825 mm (parc du W)

sols regiques bruns eutrophes — vertisols.

### *Sur roches basiques*

pluviosité : 700 mm (Niger occidental)

sols bruns eutrophes — vertisols.

pluviosité : 350-700 mm (Niger occidental et oriental)

sols brun-rouge de glacis — sols bruns tirsifiés — vertisols.

## QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

### *Matière organique*

Elle est d'autant moins abondante que le couvert végétal est moins dense et le sol plus érodé, les minima se situant sur les sols régiques ou érodés des aires sahéliennes nues (0,25 % et C/N de 6,4) et les maxima caractérisant les vertisols topo-lithomorphes (1-2 % et C/N de 8-10). Des sols les plus riches au sols les plus pauvres le taux de décroissance de la matière organique diminue de 50 % sur 20 cm à 15 % : le caractère isohumique apparaît ainsi comme la limite vers laquelle tend le profil organique lorsque le rapport de l'accumulation à la minéralisation devient lui-même très petit.

### GRANULOMÉTRIE

Les textures résultent d'une concentration progressive du squelette, résiduel ou allochtone, dans les argiles de délapidification et d'altération, vers les amonts. Les taux d'argile croissent ainsi des sols brun-rouge (25-35 %) aux sols bruns tirsifiés (25-40 %) et aux vertisols (25-57%). Ils sont en moyenne plus faibles dans les horizons A, bien qu'ils puissent y être parfois égaux ou supérieurs à ceux des horizons B. Comme il n'y a pas de manifestations morphologiques du lessivage (horizons A.2, Bt) ces variations sont attribuées à celles du micro-alluvionnement et du transit local, le ruissellement bien visible tendant finalement à exporter les fines plus rapidement. L'appauvrissement résultant est nettement moins important que dans les séquences à forte mobilité plasmique :

	Sols ferrugineux kaoliniques	Sols de glacis smectitiques
Taux d'argile en A (5 cm)	4-15	22-40
Taux d'argile en B (60 cm)	10-33	25-50
Rapport des taux (B/A)	2,1-5-1	1,0-2,2

### *Sesquioxides de fer*

Leurs proportions sont relativement fixes par rapport à l'argile (7-12 %) sauf en surface des sols des glacis les plus arides où ils s'accumulent quelque peu (12-20 %).

### *Complexe absorbant*

La masse des séquences est saturée, neutre à légèrement alcaline seuls les horizons A des termes extrêmes pouvant être légèrement acides. Du fait du gradient horizontal les capacités d'échange croissent d'amont (16-20 méq) en aval (25-40 méq). Les 9/10 en sont saturées par Ca et Mg, à parité sur les roches basiques, avec un fort excès de Ca sur les argilites. On a observé le lessivage des sulfates de ces dernières jusque sur les glacis les moins arrosés.

### *Propriétés physiques*

Comme les textures et les régimes hydriques sont topographiquement liés, il existe une relation entre les taux d'argile, la capacité d'échange et les structures des horizons (B), les valeurs minima étant de :

— 38 % d'argile et 17,5 méq pour la formation de structures en coins à faces lissées.

— 25 % d'argile et 16 méq pour la formation de structures de retrait cubiques ou prismatiques.

Le faible développement des vides macroscopiques autres que les fentes de retrait est dû à ce que la porosité totale des agrégats est du même ordre de grandeur que le volume de d'eau de rétention (PF3) : 30-40 %. Tous les sols ont le comportement de matériaux bien agrégés mais pauvres en matière organique. Les sols bruns eutrophes, très riches en agrégats stables, font exception, sans être plus perméables pour autant.

### *Conclusions*

#### LA PÉDOGENÈSE DES SOLS À ARGILES GONFLANTES

##### *Caractères synthétiques du profil*

La succession A — (B) — (B) ca cn g verticale résume cet ensemble, également caractérisé par un fort développement pédique, par la saturation au moins des horizons (B), par des teintes brunes ou noires sauf rubéfaction éventuelle de l'horizon (B). Au moins dans les vertisols le brunissement traduit une association particulière de la matière organique et du plasma minéral. Ce dernier est peu ou pas susceptible de lessivage mais est fréquemment séparé du squelette par érosion superficielle. Les sesquioxides de fer sont inclus dans l'argile ou lui sont fortement associés de telle sorte que leur concrétionnement y est très limité. Une perméabilité faible, des capacités de stockage de l'eau considérables, une macroporosité limitée aux seules fissures de retrait sont des facteurs favorables au confinement des solutions du sol nécessaire à la paragenèse smectites-carbonates.

##### *Toposéquences*

Les divers types morphologiques sont surtout des variantes structurales tenant à des modifications concomitantes de la texture et du régime hydrique réparties en séquences où seuls les carbonates de calcium et les oxydes de manganèse paraissent circuler. La rubéfaction, des structures relativement fines dues au ruissellement et à la dessiccation caractérisent les amonts. Le brunissement, le gonflement vertique, la concentration de carbonate de calcium et d'oxyde de manganèse sont liés à l'afflux des eaux dans les avals où se forment des vertisols après des intermédiaires bruns tirsifiés.

##### *Variations selon la roche-mère*

Sur les roches basiques il existe probablement un gradient topographique de l'altération et de la pédogenèse se traduisant par la diminution des capacités d'échange et l'apparition de caractéristiques de « sols ferrugineux » (rubéfaction,

contraste textural plus net) sur les amonts. L'uniformité plus grande des sols sur argilites, bruns ou vertiques, est une conséquence de celle de l'héritage minéralogique.

#### *Variations selon la pluviosité*

La réduction des taux de matière organique, la disparition locale ou la rubéfaction des horizons humifères, la formation de structures laminaires sont les effets de la diminution de la pluviosité rapidement exprimés par ces sols lourds et compacts, supports de groupements végétaux sahéliens jusqu'en zone soudanienne. Inversement une pluviosité dépassant environ 700 mm, en maintenant une végétation herbacée plus dense et pérenne, contribue à la formation des agrégats fins et stables des sols bruns eutrophes.

#### EVOLUTION DANS LE TEMPS

Les séquences anciennes sur roches basiques, à horizons grossiers déjà complexes, devaient posséder des termes rubéfiés plus proches des sols rouges tropicaux (fersiallitiques) dont on a retrouvé quelques reliques protégés, ou des horizons à concrétions ferrugineuses. Elles ont été érodées puis partiellement fossilisées de dunes, une partie de leur matériel contribuant à la formation de remblais fluviatiles. Puis les séquences se sont reconstituées, à ceci près que les translocations texturales n'étaient plus le fait que du ruissellement. Sur argilites la phase d'érosion majeure désertique est également visible mais ne semble pas avoir produit de coupure très nette dans la pédogenèse, les vertisols anciens paraissant simplement plus foncés. Elle a toutefois permis de sérier dans le temps l'ordre d'apparition des caractères de ces derniers : structures de gonflement, structures de retrait, concrétions manganésifères, nodules calcaires, assombrissement (formation de l'argile noire s.s.).

**LES SOLS RENDZINIFORMES,  
LES SOLS ALLUVIAUX CALCIMORPHES  
LES VERTISOLS CALCAIRES  
SUR MATÉRIAUX À ARGILES GONFLANTES  
CALCAIRES**

*Facteurs de formation*

**SITES ET MATÉRIAUX**

Les marno-calcaires eocènes sont à l'origine de cet ensemble. Ils affleurent largement sur les versants du réseau des « Maggia », vallées du Niger central profondément incisées dans l'entablement sidérolithique de l'Ader Douchi (p. 28). Une partie des sols est en place sur des pentes raides (2°-20°), aux gradins adaptés à la structure sédimentaire, dégagées par l'érosion d'une vieille couverture de blocs gréseux (M. 1-2). Le matériau, situé dans des poches ou des fissures, est limoneux, partiellement décalcarifié, à argiles gonflantes (interstratifiés M. 12-14). Il est argileux sur les gradins. Le reste est établi sur des proluvions et des alluvions complexes étalés depuis la base des versants jusqu'au thalweg des vallées. Réunissant des graviers, des limons fins stratifiés, des argiles de décantation ces apports sont également diversement modifiés par du matériel provenant de grès (sidérolithique, crétacé) ou de sols en dérivant.

Des travertins, des grès calcaires de nappe, des lapiez, des épandages de limons calcaires actuellement isolés du réseau de drainage, témoignent d'une période de pédogenèse, de dissolution du calcaire plus active que de nos jours et associée à un niveau phréatique plus élevé.

**PLUVIOSITÉ ET FACTEURS BIOTIQUES**

Peu perméables et ruisselant facilement les versants calcaires portent une variante subdésertique des peuplements d'Acacia caractéristiques des sols lourds à pH élevés (Acacia flava et séyal) bien que la pluviosité soit de 350 à 500 mm. Les

eaux qui s'en échappent irriguent assez généreusement les alluvions dont les cultures (sorgho, coton) ont fait disparaître la végétation naturelle à l'exception de quelques bois armés de mares (*Acacia nilotica*).

## *Les sols*

### CARACTÈRES GÉNÉRAUX

#### *Sols en place*

Ils forment une séquence régie par la croissance des taux d'argile d'amont en aval et des pentes aux gradins. Les profils, successivement A ca — C ca puis A ca — (B) ca — (B) ca verticale — C ca ont l'apparence de rendzines, de rendzines à horizons, de vertisols. Les couleurs sont uniformes, brunes foncées ou brun-jaune. Les structures des horizons A sont très fines, millimétriques, de types particulière, ou grenu, ou grumeleux, ou polyédrique, en assemblage le plus souvent lâche et meuble. Les structures des horizons (B) sont plus grossières, centimétriques, plus compactes, de type polyédrique, cubique, prismatique, en coin. Le calcaire est en grains hérités de la roche-mère, en enduits autour des éléments squelettiques, en pseudomycélium, en amas friables, en nodules. Bien que le développement pédique soit important, fin, que les acides gris forment 60 % des matières humiques, les analyses d'agrégats et le comportement des sols vis-à-vis des eaux pluviales révèlent que la matière organique n'est pas aussi fortement liée à l'argile que dans les rendzines véritables. Les sols calcaires noirs et poudreux de l'Ader Douchi sont des « para-rendzines » intermédiaires par leur stabilité structurale entre les rendzines vraies et les argiles noires tropicales.

#### *Sols sur matériaux d'apport*

La même association de couleurs brunes, de structures fines de carbonate de calcium détritique ou redistribué par la nappe ou par les eaux du sol existe dans les sols alluviaux calcimorphes et les vertisols calcaires des vallées. Ces derniers sont produits par une décantation toujours active de suspensions argileuses dans des mares temporaires naturelles ou artificielles. Plus jeunes, moins foncés (7,5 YR 4/4 contre 4/0), moins riches en nodules calcaires que les argiles noires des versants, ils se distinguent entre tous les vertisols par des structures relativement fines, très développées et stables, par des perméabilités suffisantes pour que l'irrigation y soit possible en dépit de taux d'argile de 60 % à 85 %.

### PÉDOGENÈSE

Elle n'est qu'une variante de celle des matériaux à argiles gonflantes calciques. La formation d'une phase organo-minérale foncée n'est apparente que lorsque les taux de carbonates ont été abaissés jusqu'à 20-30 %. Cette décalcarification se

poursuit tout au long de l'évolution et du transport des matériaux, depuis un minimum de 10 % sur les versants jusqu'à un maximum de 1 % dans les flats argileux. Elle n'a cependant pas de site préférentiel dans les profils, à l'exception des fissures de la roche où s'élabore le premier matériau et de quelques horizons A de sols inondés.

Deux caractéristiques sont statistiquement associées à la présence du calcaire. Les taux de matière organique sont élevés, aussi forts dès le stade para-rendzine que dans les vertisols d'autres familles (2-3 %). Les structures sont plus fines et plus stables, aussi bien au laboratoire que relativement aux agents naturels, pluie, ruissellement et inondation. Les hydroxydes de fer et les oxydes de manganèse y sont vraisemblablement moins mobiles : le pseudo-gley n'y est produit que par des durées d'inondation très longues.

### *Conclusions*

La pédogenèse actuelle des sols calcimorphes du Niger se situe entre celle des Rendzines et celles des argiles noires tropicales. Son évolution dans le temps manifeste une altération décroissante des calcaires depuis une dissolution totale jusqu'à une quasi-immunisation :

— les formes les plus anciennes des versants à pavage de grès (M. 1-2), régularisées et convexes, correspondent à une destruction complète des carbonates et des silicates de la roche-mère, avec exportation totale des produits dissous.

— les versants plus récents à gradins portent les traces d'une période de dissolution active des carbonates à lapiez et argiles gonflantes décalcifiées. Le calcaire précipitait aux exutoires de la nappe phréatique en travertins et en grès calcaires, ces derniers pétrifiant la base d'une formation sableuse analogue au remblai fluvial du pied des bas-glacis (M. 3) du socle. Une période d'érosion a suivi qui a accumulé les horizons C en cônes d'épandage limoneux aux pieds des versants.

— actuellement la décalcarification est plus limitée, la circulation des carbonates est difficile et ne produit que des accumulations ténues, toutes par sursaturation liée à l'évapotranspiration, aucune par évaporation de gaz carbonique. Des para-rendzines, des sols alluviaux calcimorphes et des vertisols calcaires topomorphes se forment sur les matériaux les plus récents.

## LES SOLS FERRUGINEUX PEU LESSIVÉS ET LES SOLS SUBARIDES BRUN-ROUGE SUR MATÉRIAUX SABLEUX

### *Facteurs de formation*

#### LE FAIT PSAMMIQUE

Le mode de mise en place des matériaux sableux, leur pauvreté en minéraux altérables héritée d'un long passé pédologique, associée à des formes particulières, dunes et remblais, des taux médiocres de plasma minéral qui à leur tour uniformisent passablement la pédogenèse et spécialisent les éléments biocénotiques. Les paysages psammiques sont ainsi hautement individualisés par leurs sols, par leur topographie par leur couverture végétale et par l'utilisation pastorale ou agricole qui en est faite.

#### LES FORMES

Les caractéristiques du modelé (nature des formes, ampleur, épaisseur de la couverture sableuse) et celles du matériau (profondeur, texture, chimisme, présence d'une nappe) sont parallèlement déterminées par les mêmes facteurs tels que l'âge, la latitude, la pluviosité, la nature du substratum de telle sorte qu'il existe une bonne corrélation entre les sols et les formes. Les accumulations sableuses recouvrent 80 % de la surface du Niger méridional ; elles ennoient presque entièrement la cuvette tchadienne, les trois quarts du Niger central et n'épargnent que le Liptako du Niger occidental.

#### *Les formes éoliennes*

La partie la plus étendue et la plus caractéristique de cette immense couverture est constituée de dunes fixées qui, se prolongeant, prennent en écharpe d'est en ouest toute l'Afrique au sud du Sahara (GROVE, 1958). Les sols y sont d'autant plus



différenciés que leur modelé est plus usé en apparence, de telle sorte que des formes basses et/ou très émoussées à sols différenciés s'opposent à des formes hautes à sols plus sableux et juvéniles.

L'amplitude des premières est généralement inférieure à dix mètres. Ce sont des dunes rondes ou elliptiques isolées ou diversement grégaires (aspects « réticulés » sur photos), des massifs longitudinaux, des « voiles » éoliens métriques. Elles sont localement parallèles, leur direction longitudinale affectant des sinuosités de très grande amplitude en tournant du sud-ouest à l'ouest. Sur la foi de similitudes géométriques, sédimentologiques et pédologiques on les réunit en un « erg unique » dit « ancien » (E. 1).

L'amplitude des secondes peut atteindre trente mètres. Formées de massifs longitudinaux de rides transversales, de cordons longitudinaux longs et étroits, elles sont réunies pour des raisons homologues en un second erg dit « récent » (E. 2), paraissant se superposer au premier ou en différant par l'orientation. Son extension est moins méridionale et ne dépasse pas l'isohyète 575 mm au Niger contre 650 mm à 850 mm pour E. 1. Situé souvent sur les rives occidentales des grandes vallées méridiennes il ne paraît jamais les « franchir ». Il ne lui correspond pas de ciselures éoliennes sur les tables cuirassées et gréseuses où la direction de la corrosion est celle de E. 1. On en conclut que l'erg E. 2 est du à un épisode éolien plus tardif, moins efficace, n'agissant qu'en des sites déterminés, exposés ou sensibles, des dunes anciennes ou encore sur des matériaux fluviaux très meubles, à des latitudes plus hautes que lors de l'épisode E. 1.

Entre les dunes mortes et les dunes vives sahariennes est une zone d'érosion complexe hydrique et éolienne centrée sur les isohyètes 200-250 mm. Observée au Niger dans le désert de TAL (BOCQUIER, GAUARD 1964) et décrite minutieusement au Sénégal (DAVEAU, 1965) elle a pour effet de détruire et/ou de fossiliser les sols évolués méridionaux d'une part et d'abaisser l'ampleur du modelé dunaire vif, cela sans en modifier la configuration générale, d'autre part. Entre les sols évolués et les sols minéraux du désert il ne peut exister ainsi de transition progressive liée à l'atténuation des processus pédogénétiques mais au contraire une aire de rajeunissement où des phases minérales ou peu évoluées se superposent ou se juxtaposent directement à des sols évolués diversement tronqués. Il est également vraisemblable que le déplacement en latitude paléoclimatique de cette frange de brassage est responsable de la plus grande partie de l'adoucissement du modelé des dunes mortes, ce dernier étant donc antérieur à la pédogenèse et non sa conséquence.

Par similitude topographique et pédologique il est possible d'identifier l'erg E.2 à l'« Ogolien » de Mauritanie (ELOUARD, 1959), dont l'âge estimé est de 15.000-20.000 BP (MICHEL, 1970). Il est possible que l'erg E.1 soit l'homologue de formations éoliennes antérieures à 40.000 BP connues uniquement en stratigraphie en Mauritanie et au Tchad (SERVANT, 1970).

### *Les formes d'origine hydrique ou mixte*

Les vallées mortes des grès et la cuvette tchadienne sont remblayées d'un matériel très finement sableux mais très pauvre en plasma minéral, à topographie plane et étagée surmodelée de rides conformes au système E.2 ou plus récentes. Il héberge des nappes phréatiques, exutoires d'aquifères très étendus localement réalimentés en eaux pluviales, qui y ont déposé des sels et des sesquioxides de fer ; le détail complexe de leur topographie est attribué à des oscillations décroissantes de niveaux fluviaux, lacustres ou phréatiques combinés à des épisodes de

façonnement éolien diminuant eux-mêmes d'ampleur dans le temps. Un seul de ces multiples accidents topographiques a une importance pédologique et donne la limite inférieure de l'âge de la rubéfaction des sols sableux. Il est matérialisé par le cordon périlacustre inactuel de 320 m de la cuvette tchadienne, daté de 5.400 BP au Tchad (SCHNEIDER, 1967), par des cordons éoliens ripuaires et par des entailles des sables rubéfiés des vallées sèches, tous à sols uniquement brunis. Une estimation de la limite supérieure de l'âge de la rubéfaction sur E.2 peut être donnée par les multiples dépôts palustres ou lacustres (argiles, limons, diatomites) qui s'emboîtent dans cette vaste formation ; elle est de l'ordre de 10.000 à 12.000 BP (FAURE, 1962).

Des textures moins légères, un modelé superficiel plan, un engorgement de profondeur très localisé et temporaire caractérisent des colluvions et des remblais fluviatiles qui se substituent à la couverture éolienne vers le sud ou dans les dépressions du socle et des sédiments marins. On y distingue deux phases. L'une, plus grossière, réunit les colluvions, la base des remblais et forme la racine de dunes anciennes (E.1). Leurs caractères sédimentologiques et pédologiques révèlent une période d'érosion hydrique accélérée des sols précédant l'invasion dunaire. L'autre est un dépôt de tarissement plus fin situé à la partie supérieure des remblais, contemporain ou immédiatement postérieur aux dunes. Ces dépôts, dits de remblai supérieur (VOGT, 1959), sont eux-mêmes incisés d'une entaille colmatée par les dépôts du remblai inférieur, aux sols plus juvéniles et non rubéfiés.

## LES MATÉRIAUX

### *Le plasma minéral*

Ses taux limitent le développement des profils. Ils ont décliné dans le temps, la pédogenèse ne compensant pas les pertes dues aux reprises éoliennes et hydriques successives, de telle sorte qu'ils se répartissent en trois classes correspondant chacune à des degrés de développement et à des âges homogènes des sols. La plus pauvre, aux sols les plus juvéniles, réunit les dunes E.2 et les sables des vallées sèches et de la cuvette tchadienne (F.2). La seconde correspond aux dunes anciennes (F.1). Le troisième groupe les matériaux aux sols les plus différenciés des remblais et colluvions méridionaux (F.0).

#### *Taux moyens, horizons C ou BC*

	Famille :	F.2	F.1	F.0
	Formation :	E.2	E.1	remblais
Argile (0-2 u)		2,2	7,0	15,5
Argile et limon (0-20 u)		2,8	8,6	20,5

Les taux moyens du fer « libre » sont égaux à 10 % de la fraction texturale 0-20 et à 13 % de la fraction 0-2 u. A l'intérieur de chaque classe ils sont indépendants du degré de rubéfaction du sol.

Les propriétés du complexe absorbant : capacité d'échange, saturation et acidité, équilibre relatif des bases échangeables, sont héritées du substrat fossilisé, cette dépendance décroissant des sables les plus anciens aux plus récents. En outre la saturation est considérablement accrue dans les zones d'émergence des grands aquifères, conséquence plus ou moins directe de la salure du paysage. En général les

sables sont acides et désaturés (pH moins de 6, V moins de 75 %), sauf dans la cuvette tchadienne où ils peuvent être neutres et saturés.

L'héritage du substrat est encore vraisemblable pour la minéralogie du plasma, ce dernier étant formé de kaolinite, de traces d'illite et de sesquioxydes hydratés comme la goéthite dans les dunes recouvrant les grès continentaux tertiaires.

### *Le squelette*

Il est siliceux, d'origine locale, homogène dans le profil et la toposéquence. Il s'est progressivement transformé dans le temps plus dans sa granulométrie que dans sa morphoscopie en conservant longtemps des caractères hérités du substratum.

Il est formé de quartz et de moins de 5 % de minéraux altérables en principe (feldspath, micas, très rares ferro-magnésiens) mais en fait à peu près immunisés contre l'altération. Il contient quelques lithoreliques et pédoreliques, agrégats siliceux, colithes et concrétions ferrugineuses, concentrées dans les dunes les plus hautes (E.2).

La granulométrie révèle la tendance à la concentration progressive de certains modes par le ruissellement (120-200  $\mu$ ), par les cours d'eau (50-120  $\mu$  et 400-800  $\mu$ ) et par le vent (200-400  $\mu$ ), les populations étant le plus souvent régionalisées par des caractères hérités persistants. La famille 0, peu homogène, réalise une sorte de moyenne par brassage des caractéristiques granulométriques des matériaux du bassin (colluvions à distributions rectangulaires) ou présente quelques phases fines et bien triées au sommet du remblai supérieur. Presque toutes les répartitions de la famille 1 se ramènent à des courbes bi-modales, à assymétrie généralement positive, à mode « éolien » net. Elles se ressemblent énormément dans les profils et dans les toposéquences, à une homogénéisation éolienne près, croissant vers le sommet des sols et des pentes. Nous n'avons pas, en particulier, retrouvé la diversité si souvent mentionnée dans les dunes vives. La tendance à l'uniformisation et à l'accroissement du tri se poursuit dans la famille 2 dont quelques phases de crêtes dunaires sont uni-modales et leptokurtiques.

L'usure des sables a été au cours de leur histoire subordonnée à la corrosion chimique puis à l'éolisation ce qui se traduit par une corrélation forte et positive entre le dépoli et l'émoussé. L'héritage lithologique est encore plus grand que pour la granulométrie, démontrant encore l'origine locale de ces sables. A partir des stocks primitifs anguleux du socle, subanguleux et luisants du crétacé, émoussés et « picotés » des grès tertiaires, on a pu mettre en évidence des transformations très lentes dans les sables argileux F.0, de ceux-là aux dunes anciennes où se forment de petites quantités de grains ronds et mats. Ces derniers sont parfois plus abondants dans les dunes récentes. La morphoscopie des sables du profil est constante, sauf dans de rares cas d'horizons ferritisés (concrétions de nappe) dont le dépoli est plus élevé.

### PLUVIOSITÉS

Entre les dunes semi-fixées et la limite méridionale de ces sols en Afrique de l'ouest la pluviosité varie de 250 à près de 1 000 mm (875 mm au Niger), des restes fossiles en étant connus à 100 mm (BOULET, 1966). La probabilité de participation du solum aux échanges hydriques annuels décroît vers le nord plus vite que ne se

modifient les caractéristiques pédologiques (p. 5-6), à peu près invariables en ce qui concerne les horizons B. L'évolution des sols peut donc être attribuée comme leur mise en place à des climats inactuels, du moins pour l'essentiel. Ces derniers peuvent être grossièrement estimés par extrapolation au passé de certaines limites pluviométriques actuelles, en négligeant le fait que certains phénomènes paraissent étrangers au milieu intertropical local actuel (grès calcaires pétrifiant la base des sables du remblai de l'Ader Douchi, pp. 64 et 66) :

— la pluviosité a baissé de 900 mm sur l'isohyète actuel 1 000 mm et de 500 mm sur l'isohyète 600 mm lors des épisodes arides E.1 et E.2, respectivement (extrapolation de la limite actuelle des dunes vives).

— elle a augmenté de 500 mm à 900 mm sur l'isohyète 100 mm lors de la formation des sols des dunes anciennes (extrapolation de la limite méridionale de ces sols, à développement pédologique égal).

— elle a augmenté de 275 à 400 mm sur l'isohyète 350 mm lors de la formation des sols moins différenciés de la famille 1 (extrapolation de la limite septentrionale du concrétionnement de nappe).

— une pluviosité de 600 mm pendant au moins 5 000 ans sont nécessaires à la formation des types les moins différenciés de la famille 1 (observations faites sur le cordon de 320 m, GAVAUD, 1968).

En gros, au centre du Niger, la mise en place et l'évolution de ces sols se sont accompagnées d'une ou plusieurs oscillations pluviométriques de demi-amplitude moyenne de l'ordre de 500 mm. Des pluviosités soudaniennes (600-1 000 mm) s'exerçant pendant des durées de l'ordre de la dizaine de millénaires ont été nécessaires à leur formation.

## FACTEURS BIOTIQUES

### *Végétation* (cf. p. 18 et suiv.)

Entre les forêts claires et le désert la végétation des sols sableux est normative des zones soudaniennes et sahéliennes, l'extension en latitude et les nuances physiques et chimiques de ce matériel permettant le développement d'un grand nombre de formations. L'ensemble caractéristique des sols acides est bien représenté au sud et sur les substrats désaturés (sols ferrugineux), depuis des forêts à *Anogeissus* méridionales jusqu'aux steppes à *Commiphora* au nord en passant par les diverses savanes arborées à *Combrétacées*. L'ensemble à *Acacia*, *Salvadora* des sols et des substratums neutres est bien représenté au nord et dans les dépressions de la famille 2 (sols subarides). L'effet de la texture sableuse est de raréfier les physionomies contractées et densément arbustives, de les limiter au milieu subaride où elles sont moins liées à une succession pédologique comme le sont les « brousses tigrées » des sols peu perméables qu'à un motif topographique indéfiniment répété (aspect « réticulé »). Inversement les faciès très ouverts sont plus étendus sous les effets conjugués de la dilution des réserves hydriques et des destructions dues à l'homme. L'un d'eux, la steppe herbeuse vivace à *Aristida* ou *Hypparhenia*, est caractéristique de la famille 2.

On a mis en évidence une variation parallèle du couvert, de la production de matière sèche, de la profondeur d'enracinement de la strate herbacée d'une part et de l'épaisseur des épipédons, des taux de matière organique d'autre part, toutes grandeurs diminuant avec la pluviosité vers le nord. L'hypothèse de l'inactualité des

horizons B des sols rubéfiés trouve un début de confirmation dans le fait que sur sables F. 1 ils ne sont plus prospectés par les racines des graminées au nord du sahel.

Les savanes arborées densément peuplées de la partie centrale du manteau sableux (400 à 700 mm) sont probablement des paysages anthropiques, l'effet des défrichements étant de clairsemer la strate ligneuse et de favoriser les strates annuelles aux dépens des strates graminéennes vivaces.

### *Faune*

Les fousseurs sont nombreux et divers. Ils sont localisés par les propriétés physiques du sol et par les excès thermiques superficiels aux horizons A. 2, AB, aux contacts avec un substratum imperméable peu profond. Ils tendent en retour à adapter les épaisseurs à leurs exigences écologiques et à réduire l'anisotropie verticale du profil, en remontant fines et bases (termites). Ils maintiennent à un bas niveau la différenciation des sols les moins évolués (F. 2) qui sont aussi les plus meubles.

### *Utilisation*

Les sols sableux se sont si bien imposés par leurs qualités physiques et par leur extension à une agriculture techniquement peu armée qu'elle en paraît parfois la prisonnière. Une sélection empirique en a été faite sur des critères de pluviosité, de site, de texture et de fertilité chimique. Les sols les plus désaturés ou les plus secs parce que trop septentrionaux ou trop légers ou trop accidentés ou trop imperméables sont abandonnés ou pâturés. Les cultures, pluviales et de médiocre niveau technique, ne font que se substituer à la strate herbacée naturelle dont elles reproduisent la zonation. La zone d'élevage est à moins de 350-425 mm de pluies. De là jusqu'à 525 mm jachères et cultures de millets couvrent 25 à 50 % des surfaces, ce taux passant à 100 % dès 600 mm dans la zone arachidière. Les textures moyennes de F. 1 sont les plus recherchées. Les sables pauvres F. 2 sont négligés (20 % des hautes dunes E. 2 cultivées à 600 mm) sauf tout au nord où leur très grande perméabilité leur donne l'avantage. Inversement les sables argileux F. 0 ne sont largement utilisés qu'au sud, à 800 mm de pluies (sorgho). Les modelés très aplanis (dunes E. 1 et remblais), les substratums sur sols fossiles ou roches neutres sont recherchés. L'occupation des sols sableux est actuellement très inégale mais a pu s'étendre à leur quasi-totalité, à l'exception éventuelle de certains terroirs très acides (sur argilites Ct. 2), par suite de l'itinérance à diverses échelles de temps et d'espace qui est la conséquence de l'instabilité des facteurs qui la détermine : pluviosité, fertilité actuelle, état des techniques, répartition des ethnies.

Bien que le travail du sol puisse être bénéfique pour certains types évolués l'effet sur la conservation physique et chimique est finalement négatif, probablement parce que la dénudation trop prolongée accélère les processus normaux d'érosion et que les restitutions sont insuffisantes.

## LES PAYSAGES PSAMMIQUES PRINCIPAUX

Les variations parallèles mais discontinues des modelés, des matériaux, des sols et l'adaptation réciproque de ces derniers avec la couverture vivante permettent d'isoler plusieurs ensembles biogéocénétiques. Ils correspondent à des générations

successives de sols, sur des matériaux de plus en plus pauvres en plasma minéral, à pédoclimats de plus en plus secs. Les sols les plus différenciés se sont formés sur des sables argileux (F. 0) de pentes ou de remblais, sur des topographies planes et peu pentues, sous des forêts claires ou des savanes boisées. Ils sont relativement plus fréquents à plus de 750 mm, sensibles à l'érosion hydrique, cultivés surtout au sud. Les sols moyens des dunes basses (F. 1) se sont développés sur des topographies mollement ondulées, sous des savanes plus claires. Ils sont présents du désert jusqu'à l'isohyète 1 000 mm et très cultivés à plus de 425 mm de pluies. Les sols les plus pauvres (F. 2) et les moins évolués des hautes rides dunaires et des grandes dépressions lacustres ou palustres sont caractérisées par des steppes herbeuses vivaces et par leur sensibilité à l'érosion éolienne. Ils sont plus rares à plus de 575 mm de pluies et pâturés plutôt que cultivés.

### *Les sols*

#### DONNÉES MORPHOLOGIQUES

##### *Le profil*

L'organisation A. 1 — A. 2 — B — C est la plus fréquente, avec des variations très graduelles entre horizons. L'horizon A. 1 gris ou brun possède une micro-structure granulaire se manifestant macroscopiquement par des structures massives, laminaires, nuciformes dues aux agents météoriques ou aux organismes vivants redistribuant ou compactant inégalement les sables. La couche de porosité biologique maximum tend à coïncider avec l'horizon A. 2 (ou R), plus clair et coloré. Le ou les horizons B, bruns, jaunes ou rouges, sont plus colorés, structurés et riches en plasma minéral, la situation relative de ces divers maxima étant des plus diverses mais s'ordonnant en moyenne ainsi, de bas en haut : texture, couleur, structure. Les structures varient parallèlement aux textures et sont diagnostiques des trois grandes familles. Les extrêmes se situent dans les sols peu différenciés (F. 2) à structure granulaire à grains vêtus (débit mamelonné de cohésion faible) et dans les sols des remblais (F. 0) à structure intertextique (débit polyédrique ou structure polyédrique en assemblage compact). Ces derniers contiennent des volumes structuraux sans limites définies nés de tassements locaux du squelette et d'une concentration du plasma minéral dont les fragments se révèlent stables aux analyses d'agrégats. La transition au matériau se fait par des horizons BC montrant assez vite la structure granulaire homogène de l'horizon C mais ne perdant que très graduellement la texture et la couleur des horizons B. L'épaisseur des sols sableux, dont nous donnons ci-dessous quelques extrêmes, est de ce fait difficile à déterminer :

Famille	Côte du sommet de l'horizon (cm)	Horizon	Pluviosité (mm)
F. 0	plus de 400	BC	775
F. 1	325	C	550
F. 1	311	C	415
F. 2	185	C	525

### *Traits pédologiques secondaires*

**Traits laminaires.** La distribution discontinue du plasma en plans onduleux irrégulièrement conformes à la topographie ou au litage est caractéristique des matériels sableux. Elle se matérialise sur les profils par :

- des stries, plans décolorés très minces ( $10^{-1}$  mm) où une certaine éluviation ou réduction prendraient place. Elles sont spécifiques des horizons A et présentes même en zone aride.
- des raies, traces de plans plus épais (10 mm), isochromes des horizons B dans ou au dessous desquels ils se forment préférentiellement. Ce sont des concentrations de plasma minéral et parfois de matière organique.
- des bandes, plus épaisses que les raies et formées de deux micro-horizons au moins, le supérieur décoloré.

Le passage continu des stries aux raies, des raies aux bandes, par permanence des accidents squelettiques, épaissement et coalescence, a été observé. Le développement des horizons d'accumulation laminaires discontinues est lié à des situations topographiques moyennes ou basses, les sites très secs ou très humides étant défavorables. Il aboutit à la substitution des horizons B normaux par des groupes de raies ou bandes réparties dans une matrice éluvée (horizons E/B).

**Volumes nodulaires.** Les volumes polyédriques des horizons B (F. 1, F. 0) s'individualisent parfois fortement par leur cohésion et donnent naissance dans quelques cas (F. 0) à des taches ou « concrétions » tendres rouges modérément individualisées par ferritisation.

**Traits dus à la nappe.** Le séjour permanent d'une nappe à faible profondeur dans les sables les plus poreux (F. 1, F. 2) y produit des déplacements et concentrations caractéristiques des hydroxydes de fer exprimés par :

- dans la nappe, des sables blancs particuliers lavés de presque tout leur plasma minéral.
- dans la frange capillaire des sables ferritisés jaunes meubles couronnés d'un banc discontinu de gros nodules ferrugineux aux formes curieuses parfois pyramidales. Ces derniers sont « limonitiques », porphyrosquelettiques, dus à la coalescence d'éléments nodulaires à la base, tubulaires à croissance apicale ascendante au sommet, ce dernier parfois enrichi en oxydes de manganèse.

Les grès calcaires de l'Ader Douchi sont un second type de dépôt de nappe très exceptionnel, associé à des travertins.

Le confinement des solutions à la base des sols au-dessus d'un substrat peu perméable (nappes « perchées ») produit des traits analogues moins développés, outre un brunissement et un durcissement de tout ou partie des horizons B (F. 1, F. 0). Sur les substrats appropriés (granites, roches basiques, arkoses) des concentrations discrètes de calcium ou de carbonates (pseudo-mycélium) accompagnant la redistribution du fer.

### *La toposéquence (drainage local)*

Sur les pentes les profils varient continûment en fonction des caractères stationnels locaux de déclivité et d'épaisseur du matériau, indépendamment de l'extension relative des diverses parties de la séquence ou du modelé. Ils forment plutôt des toposéquences que des chaînes, bien que les possibilités de circulation latérale soient théoriquement prévisibles ou pratiquement vérifiées (AUDRY, 1962) sur ces matériaux. Du sommet à la base des pentes les sols varient partout de même façon par assombrissement du profil :

- les horizons A passent des teintes 7,5 YR aux teintes 10 YR
- les horizons B passent des teintes 2,5 YR aux teintes 5 YR puis 7,5 YR

en même temps que raies, bandes, concrétions ferrugineuses, accumulations calcaires se font plus fréquentes et importantes, que les horizons B ou BC durcissent en sec. L'organisation A-B-C est conservée avec fidélité, tant que les processus d'hydromorphie ou d'accumulation discontinue (profil décoloré A-E/B-C ou G blanchi) ne sont pas trop prononcés. En particulier les profils brunis de bas de pente conservent leurs horizons B argilo-ferrugineux.

### *Les ensembles régionaux (drainage général et chimisme régional)*

D'une toposéquence à l'autre les séries se succèdent dans le même ordre et sont homologues. Leurs extensions relatives varient beaucoup, certaines d'entr'elles pouvant manquer, mais sont définies à l'échelle d'ensembles régionaux (10 à 10<sup>2</sup> km) caractérisés par leur situation géographique dans les bassins, par les mêmes motifs topographiques élémentaires, par le même substrat pédologique fossile. On suppose que ces données déterminent un « drainage général moyen » estimé qualitativement par le drainage relatif des séries dominantes dans une toposéquence compréhensive de référence. On a ainsi :

- des drainages généraux forts, à séries à horizons B rouges 2,5 YR et 5 YR dominantes, à profil épais mais peu contrasté, sur plateaux gréseux, sur ensablements des interfluves amont des alluvions anciennes de Maradi, sur ensablements d'obstacles.
- des drainages généraux modaux, avec une succession complète des séries (rouges à brunes), sur versants gréseux (Ct. 3).
- des drainages généraux de plus en plus faibles :
  - = à séries rouges (2,5 et 5 YR) à raies dominantes sur des bas-glacis crétacés à dunes très basses.
  - = à séries rouges et jaunes (5 YR et 7,5 YR) à raies sur bas-glacis du socle à dunes basses.
- des drainages généraux très faibles à séries jaunes ou blanches à raies ou bandes (horizons B ou E/B 7,5 YR et 10 YR) dominantes sur des dunes de dépressions des grès tertiaires ou crétacés.

Il est à remarquer que la famille F.2, sans doute à cause de sa perméabilité, ne présente que des drainages moyens ou forts.

Le chimisme hérité du substrat modifie indirectement la morphologie sur des ensembles régionaux généralement plus étendus que les précédents. Les sols sableux fossilisant des sols ou des substrats saturés ont des épipedons plus sombres, plus organiques, plus stables et résistant mieux à l'érosion que ceux des sols recouvrant un matériel désaturé. Ils sont également seuls à contenir des concentrations carbonatées. Les bas-glacis à sols smectitiques et riches en bases étant septentrionaux, ces caractères affectent également une disposition zonale.

### *Les variations en latitude*

A l'exception ci-dessus près, les sols sableux ne varient en latitude que dans leurs horizons A, les horizons B restant constants. La transformation zonale des épipedons résulte d'une modification dans les rapports des mécanismes divers sous la dépendance des agents météoriques et biologiques :

- = mécanismes de dégradation : amenuisement lent des horizons A par l'érosion hydrique, brunissement et durcissement des horizons B ainsi exposés aux eaux météoriques.
- = mécanismes de fossilisation par des sables ruisselés ou éoliens prélevés sur la séquence elle-même.
- = mécanismes de reconstitution par accumulation de matière organique, développement de la porosité biologique, formation de stries ou de raies, début de rubéfaction (F.0, F.1). La mobilité plasmique impliquée par ces derniers mécanismes apparente cette néo-évolution à celle du profil dans son ensemble, le lessivage des bases restant toutefois plus faible.

En un lieu donné les phases d'érosion, de fossilisation, de reconstitution se succèdent

sans synchronisme, les aires correspondantes se juxtaposant en mosaïque, à l'exception probable de périodes de destruction généralisée liées à des excès cultureux et matérialisés par des surfaces fossiles très étendues (Kadzel, Gober). Du sud au nord l'équilibre est déplacé en faveur des mécanismes de destruction et fossilisation la succession normale A.1 - A.2 - B se transformant en A - B (sol en voie d'érosion) ou A - (B) - 2B durci (sol fossilisé et reconstitué). La transformation est continue mais, l'environnement écologique aidant, on y voit des paliers définissant des « faciès » :

— à moins de 450 mm sont les faciès subarides (ou sahéliens) à épipedons minces (moins de 31, 36, 11 cm respectivement pour F.2, F.1, F.0) et colorés en bruns (chroma et valeur supérieures à 4-5). Le sol est dit « brun-rouge » si l'horizon B est coloré, « brun » si l'horizon B l'est moins (7,5 ou 10 YR). A moins de 350 mm les croûtes organiques et les sables particuliers du sous-faciès subdésertique remplacent progressivement les horizons A continus et finissent par former vers 250 mm une nappe meuble saisonnièrement mobilisée précédant elle-même l'erg vif (100 mm).

— à plus de 450 mm sont les faciès ferrugineux (ou soudaniens) normaux. A plus de 750 mm apparaît un sous-faciès caractéristique des forêts claires, à épipedon sombre.

De la famille F.0 à la famille F.2 l'érosion hydrique et la néo-évolution ferrugineuse diminuent en importance relative, le brassage éolien et la concentration superficielle des bases augmentant. Les sols les moins différenciés prennent ainsi plus tôt et facilement le faciès subaride.

### *Synthèse par grandes familles*

L'organisation modale des sols les plus différenciés (F.0) est : A.1 - A.2 - AB - B.2 t - B.3 cn ox, les horizons B présentant souvent des volumes nodulaires, parfois des raies, toujours un débit polyédrique. Le drainage général est fort ou moyen, pour les quelques sites connus. Les types érodés dominant dans les faciès sahéliens. Le sous-faciès ferrugineux méridional est bien représenté.

La famille F.1 réunit des types modaux pour les sols ferrugineux peu lessivés : A.1 - A.2 - B.1 (structure) - B.21 (couleur) - B.22 (texture) - BC - C. Les structures des horizons B sont massives à débit mamelonné. Raies et bandes sont fréquentes au niveau du contact A/B, leur développement progressif produisant finalement des sols décolorés A - E/B - C. Tous les degrés du drainage général sont présents.

Les sols les moins différenciés de la famille 2 sont de type A - (B) - C avec des horizons B de couleur presque particulières. Les raies et bandes y sont très rares, mais le concrétionnement de nappe y est fréquent. Même dans ce dernier cas le drainage général reste fort ou moyen. La néo-évolution ferrugineuse est incertaine et le brassage éolien très important dans le faciès subaride.

### **DONNÉES ANALYTIQUES**

#### *Matière organique*

Elle décroît régulièrement avec la profondeur, ce qui ne permet pas de définir d'horizon organique (A.1) par des taux de carbone, selon des fonctions semblables (logarithmiques, linéaires) partout jusqu'au niveau de la série. Il n'y a pas de profil isohumique au sens strict et il n'est pas possible de séparer les sols septentrionaux et méridionaux par le critère de répartition. Par contre les taux croissent continûment vers le sud parallèlement à la pluviosité selon un gradient de l'ordre de 0,03 % pour 100 mm de pluies. De même les taux croissent avec ceux de l'argile de la famille 2 à la famille 0 :

	F. 2	F. 1	F. 0
Nord (380-430 mm)	0,22 %	0,236 %	0,248 %
Sud (650 mm)	0,28	0,312	X
Sud (750-820 mm)	X	0,336	0,610

Enfin les sols « vierges » sont à peine plus riches que les sols cultivés, de 14 à 17 % en valeur relative. Ces valeurs médiocres, leur faible sensibilité aux facteurs favorisant l'accumulation, pluviosité et couvert végétal, traduisent un rapport défavorable d'origine thermique entre la synthèse organique et la minéralisation, aggravé vers le nord par l'aridité croissante.

Les C/N, peu élevés, sont encore moins sensibles au gradient pluviométrique. Il n'y a de différences significatives qu'aux deux extrémités de la distribution, sur sables F.1 (9, ± 2) et sur sables argileux F.0 (12, ± 2).

Quelques analyses des fractions humiques (C. THOMANN, 1964) situent les sols sableux entre les sols ferrugineux lessivés et les sols bruns tirsifiés dans la suite qui va des sols faiblement ferrallitiques aux vertisols par accroissement des taux d'humification, des proportions d'acides fulviques. Dans les termes bien drainés les acides fulviques s'accumulent relativement dans les horizons B ainsi que les acides humiques polymérisés liés par  $Fe^{3+}$ , répartition conforme à une migration associée de l'ensemble du plasma. Les termes à drainage interne limité (brunis, à base jaunée, concrétionnés..) sont plus pauvres en acides fulviques. Les acides humiques liés par  $Ca^{2+}$  s'y accumulent relativement en profondeur, que la morphologie indique ou non une translocation de l'argile importante ou non. Si donc la liaison entre le drainage local et le type de matière organique est claire, elle ne l'est pas du tout entre ce dernier et la morphologie du sol. Il n'y a guère de différences entre les faciès ferrugineux et subarides.

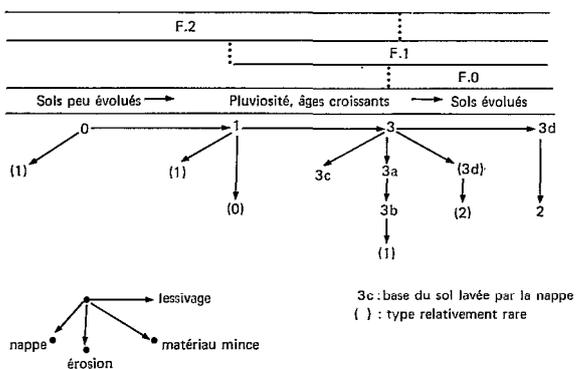
#### *Argiles et sesquioxydes de fer*

Dans les sols sableux la limite de taille du plasma est plus proche de 20 microns que de deux microns. Les sesquioxydes de fer y sont mesurés par le fer total plutôt que par le fer « libre » qui forme 50 à 90 % du précédent seulement alors que les minéraux primaires sont pratiquement absents. Ce sont deux mesures différentes de constituants très voisins.

Les courbes de répartition de l'argile, de l'argile et du limon fin, du fer libre et du fer total ont les mêmes formes classées en divers types selon qu'elles indiquent un profil homogène (0), un solum plus riche (1), un horizon A plus pauvre (2), un « ventre » d'argile en B avec un minimum en A (3a) ou en C (3b), enfin une croissance indéfinie jusqu'à la base du matériel de sol ou de fosses profondes (3d). Chaque type caractérise un ou plusieurs ensembles biogéocénétiques :

Types dominants, fréquences sur 10		Argile, Argile + limon	Fer « libre » Fer total
<i>F. 2</i>			
cuvette tchadienne	type 1	5	3,1
	types 3 (a + b)	3,3	6,0
dunes E. 2	types 3 (a + b)	6,8	8,8
<i>F. 1</i>			
dunes E. 1	types 3 (a + b)	7,8	5,2
	type 3 d	0,5	3,5
<i>F. 0</i>			
remblais, colluvions	type 3 d	6,7	7,0

mais tous peuvent s'observer simultanément dans des unités aussi homogènes morphologiquement que des séries. Il est donc probable que l'organisation du profil dépend au moins autant de l'agencement du plasma minéral que de sa quantité, cette dernière étant régie dans ses valeurs et sa répartition par des facteurs agissant à des échelles très variables :



le plasma se concentrant dans le solum d'abord puis dans des horizons de plus en plus profonds, l'âge et la pluviosité croissant.

Les profils des sesquioxydes sont parallèles à ceux de l'argile ou indiquent une accumulation plus nette et/ou profonde. Les sols peuvent être classés relativement à ce décalage :

Fréquences sur 10 « Lessivé » = types 2 + 3 « Non lessivé » = types 0 + 1	Non lessivés en fer ni argile	Non lessivés en argile, lessivés en fer	Lessivés en fer et argile
<b>F. 2</b>			
Cuvette tchadienne			
faciès brun-rouge	5,45	2,9	1,65
faciès ferrugineux	2,5	2,5	5,0
Dunes E. 2			
faciès brun-rouge	1	3	6
faciès ferrugineux	1,4	0	8,6
<b>F. 1</b>			
Dunes E. 1			
faciès brun-rouge	0	2	8
faciès ferrugineux	0,35	0	9,65
<b>F. 3</b>			
tous faciès	0	0	10

La concentration en fer démarre donc plus tôt mais est très vite accompagnée par celle de l'argile, les sols non lessivés en argile mais lessivés en fer étant toujours minoritaires.

### Bases, pH

Le pH et la saturation sont des fonctions décroissantes de la pluviosité dépendant du chimisme local, soit du substratum fossile et du voisinage éventuel de sols salés. Les gradients varient de 0,39 pH pour 100 mm de pluies (F.2) à 0,23 pH (F.1 sur grès Ct. 3), avec des valeurs médianes comprises entre 7,4 (380 mm, cuvette tchadienne) et 5,4 (grès, 740 mm), les taux de saturation correspondants

étant de 100 % et 53 %. La neutralité est atteinte entre les isohyètes 350 à 410 mm, selon la famille, ces limites coïncidant à peu près avec celles de la zone sahélienne et des faciès subarides.

Les horizons B sont toujours acides, dans une mesure qui dépend encore du chimisme local. Celui des horizons profonds est sous la dépendance des actions de nappe, des manifestations biologiques au contact des niveaux peu perméables fossiles. Si le drainage est libre le pH est acide ; s'il est limité le pH est neutre à légèrement alcalin.

La répartition des bases échangeables est régie par l'antagonisme entre les remontées par la végétation de certains cations (Ca, Mg, K) et l'accroissement des capacités d'échange vers la profondeur (lessivage). Le premier mécanisme est plus important sur les substrats désaturés où le maximum est en A.1, le second prédomine ailleurs où le maximum est en B. L'équilibre relatif des cations est lui-même également hérité, la carence calcique des sols ferrugineux lessivés du continental terminal se retrouvant dans la couverture dunaire locale.

### *Propriétés physiques*

Il n'y a de taux d'agrégats mesurables que dans les horizons B des sols les moins sableux (F.2, F.3). Les réserves hydriques sont une fonction de la texture et croissent de 20-30 mm/m (PF 3, F.2) à 95-150 mm/m (F.0). Elles sont plus facilement reconstituées dans les sols les plus sableux (F.2), plus profondément réparties et moins accessibles à l'évapotranspiration, mais leur volume ne permet le développement que d'une végétation limitée (steppes).

### *Conclusions*

#### CARACTÈRES GÉNÉRAUX DE LA PÉDOGÈNESE

Elle est proche de celle qui produit les séquences à sols ferrugineux lessivés rubéfiés (p. 44). Elle donne une majorité de sols colorés ABC par les mêmes processus de lessivage et d'accumulation, de rubéfaction, agissant plus à l'échelle du profil qu'à celui de la séquence.

Elle possède néanmoins des nuances ou des caractères particuliers. La mobilité des sesquioxydes de fer relativement à l'argile est moindre et se traduit généralement par un simple décalage des profondeurs des maxima. Le concrétionnement est nul ou faible, sinon d'origine externe. Le profil du plasma minéral et le profil morphologique ne sont pas aussi fortement liés, celui-ci restant stable alors que celui-là varie sous l'effet de combinaisons aléatoires de mécanismes externes de remaniement et de lavage. Les variations texturales et structurales sont modérées et progressives, de sorte que leur effet en retour sur le drainage interne n'est pas décelable, sauf dans le cas d'accumulations discontinues, ces dernières aussi spécifiques des matériaux sableux que les profils originaux produits dans les cas extrêmes de leur développement.

Ces textures maintiennent les perméabilités à des niveaux qui limitent et fixent l'évolution, elle-même indépendante d'une minéralogie entièrement héritée. Les

remblais (F. 0) portent ainsi les mêmes sols rouges aussi bien dans le domaine des sols ferrugineux lessivés kaoliniques que celui des sols eutrophes et vertiques à argiles 2:1 (p. 59). L'héritage du substrat pédologique ou lithologique est cependant partout, dans le squelette, le plasma, les bases, mais il ne se manifeste que par des caractères secondaires bien que souvent décisifs du point de vue agronomique. Il tend à s'effacer d'autant plus que le sol est moins différencié, paradoxe explicable par l'histoire de ces matériaux. L'indépendance entre l'évolution pédologique et le degré d'altération, la restriction des mécanismes pédogénétiques, le resserrement de la différenciation font l'originalité des sols psammiques et les isolent nettement au sein des Classes auxquelles on peut les rapporter (GAVAUD, 1968).

Le développement des traits laminaires, de nappe, de l'assombrissement du profil, caractères liés à un changement qualitatif de la matière organique, isolent divers types morphologiques en fonction du drainage local et général, autrement dit de la position sur les pentes et de la situation dans les bassins. Le degré moyen de différenciation de ces séquences, dont la texture et la structure des horizons B sont le meilleur critère, est constant au sein d'un petit nombre d'ensembles possédant des caractères biogéocénétiques précis et distincts. Finalement un gradient latitudinal, pluviométrique, se superpose au tout. Une partie en est inactuelle et a trait à la mobilité réduite de l'argile dans les horizons rubéfiés les plus septentrionaux. De nos jours la diminution de la pluviosité provoque une obsolescence progressive des horizons profonds et une retouche des épipedons. L'épaisseur en est diminuée par déplacement de l'équilibre entre l'érosion et la pédogenèse, la lixiviation des bases recyclées par la végétation est réduite ainsi que le lessivage de l'argile et du fer, ce dernier n'étant toutefois pas absolument absent de phases d'apport très récentes. L'accumulation de matière organique est plus faible mais sa répartition n'est pas modifiée.

#### EVOLUTION DANS LE TEMPS

L'invasion des sables confirme la tendance générale à l'assèchement indiquée par les sols antérieurs ainsi que la coïncidence entre les phases sèches et les périodes d'érosion. Des générations successives de sols de moins en moins différenciés ont été produites par l'élimination du plasma du fait de reprises éoliennes et hydriques et de la diminution de pluviosité des phases pédogénétiques, attestée par la baisse des niveaux phréatiques et lacustres. Lors de chaque oscillation climatique se répétait la même suite d'événements :

— érosion mixte des sols, hydrique et éolienne, pendant la première phase de l'assèchement, selon des modalités comparables à celles qui existent actuellement dans la zone de transition au désert entre 100 et 250 mm de pluies. Les sols sont rajeunis, surtout les moins différenciés et les plus exposés sur les points hauts du modelé, mais les grandes masses sableuses ne sont pas déplacées. Plus au sud une frange d'érosion hydrique accélérée touche tous les sols.

— remodelage en dunes vives des aires rajeunies au maximum de l'aridité, les surfaces mieux conservées et plus basses étant fossilisées ou transformées en aires de déflation.

— destruction des modelés vifs lors du retour des conditions subdésertiques.

— pédogenèse sur des pentes modérées et des matériaux homogénéisés dont l'acquis pédologique est d'autant plus important que la couverture antérieure est plus évoluée.

Plusieurs de ces pseudo-cycles ont produit autant de générations de sols :

— les sols des glacis, ferrugineux lessivés pour la plupart, ont été progressivement réduits à leurs horizons grossiers et à des proluvions. Un premier système dunaire, E. 1, a réorganisé ce manteau sableux jusqu'à 1 000 mm actuels. Le tarissement des cours d'eau dépose un premier remblai pendant toute cette période (sud) ou au début et à la fin (nord). Une première génération de sols se forme sur ces matériaux éoliens et fluviatiles dans des conditions de grande humidité dont les traces sont encore visibles sur l'isohyète actuel de 100 mm. Elle est formée de sols ferrugineux peu lessivés typiques (F. 1 et F. 0), certains faisant transition avec les séquences anciennes dans les aires les moins transformées.

— un second système dunaire, E. 2, remodèle les points hauts de E. 1 jusqu'à 600 mm actuels ainsi que les sables de la cuvette tchadienne et des « Dallois ». La récurrence humide suivante, moins prononcée, produit la seconde génération de sols sableux dont le profil est surtout fait de variations de couleurs.

— les fluctuations ultérieures ne produisent que des édifices mineurs (second remblai, cordons de rivage, « nebkas ») et des sols hydromorphes ou peu différenciés, bruns, étudiés au chapitre suivant.

— actuellement les épipédons se diversifient en latitude, le faciès subaride apparaissant à moins de 450 mm. Le brassage éolien et biologique maintient les sols de la deuxième génération à un bas niveau de développement, alors que le décapage et le ravinement assèchent et détruisent les sols de la première génération.

Finalement la succession du sud au nord des sols différenciés des remblais et des recouvrements sablo-argileux, des dunes basses E. 1, des dunes hautes E. 2 exprime la croissance d'influences désertiques cumulées dans le temps et dans l'espace.

## LES SOLS PEU DIFFÉRENCIÉS BRUNS SUR MATÉRIAUX SABLEUX

### *Facteurs de formation*

Les séquences à sols rubéfiés disparaissent de formations sableuses dont le drainage est actuellement excellent. Elles sont remplacées par des sols de teintes brunes à profils A-C ou A-(B)-C dont le niveau moyen de différenciation et la richesse en plasma minéral sont inférieurs ou à la limite égaux à ceux de la « seconde génération » de sols ferrugineux peu lessivés ou brun-rouge (p. 97). Comme les sables bruns se superposent ou oblitèrent les sables rubéfiés on admet qu'ils forment une « troisième génération » plus récente de sols psammiques, elle-même subdivisible en sous-unités chronologiques pour des raisons analogues de disposition corrélées avec des nuances dans le degré de différenciation.

Parmi ces formations les unes ont toujours été bien drainées ; ce sont des édifices éoliens d'importance moyenne ou minime. D'autres ont subi un régime hydromorphe, ce sont des plateformes construites ou d'abrasion, plages lacustres ou banquettes fluviales, souvent associées aux formes précédentes.

Les plus grandes surfaces de sols bruns sont situées au cœur de la cuvette tchadienne (p. 69). Elles comprennent un premier complexe péri-lacustre ancien, large parfois de plus de 20 km, s'étendant jusqu'au Tchad et au Cameroun (cordon de Yagoua-Limani-Bongor, PIAS et al., 1957) au travers de la Nigeria (Bama ridge, GROVE et al., 1963). Il est fermé en amont par une ride haute et continue, le cordon de TAL (PIRARD, 1964), culminant à 340-350 m, dominant la « plage » de SAYAM, large plaine ondulée située à 315-320 m. Cette dernière est limitée en aval par un cordon plus petit (322-326 m) suivi d'une seconde « plage » à 300 m dominant de quelques mètres les alluvions fluvio-lacustres plus argileuses de la Komadougou. Le second complexe jouxte le lac actuel. Il comprend en amont un cordon (287-295 m) et en aval les plages subactuelles et actuelles balayées par les marnages séculaires ou annuels, entre les cotes 280, 85 et 284, 25 pour ce dernier siècle (BOUCHARDEAU et al., 1957). Ces deux ensembles évidemment successifs introduisent une coupure chronologique et évolutive dans les sols bruns, les plus anciens et différenciés, vieux d'environ 5 000 ans (p. 79), étant situés sur le premier complexe (S. 3a), les plus récents (S. 3b) étant situés sur le second.

Il en existe encore des surfaces importantes dans les vallées mortes traversant les grès. « Dallols », du Continental Terminal et « Goulbis » du Crétacé. Ils y sont situés soit sur des cordons étroits bordant les rives occidentales (sols S. 3a), soit sur des plaines larges parfois de plusieurs kilomètres encaissées de quelques mètres dans les sables du remblai rubéfié.

Le reste est pulvérisé en une succession de buttes éoliennes aux sols de plus en plus récents surmodelant toutes les formations sableuses. Leur fréquence croît en raison inverse de l'évolution des sols, des dunes anciennes E. 1 aux dunes récentes E. 2 puis aux sables à sols bruns, des plaines aux reliefs, du sud au nord. Vers 250 mm elles se confondent avec la nappe sableuse semi-fixée actuelle.

Ces matériaux excessivement meubles et filtrants contiennent les taux minima de plasma minéral, 0 à 2 % d'argile et limon fin, 0,25 à 0,50 % de fer « total ». Ils évoluent sous des pluviosités de 250 à plus de 800 mm, avec des phénomènes actuels d'hydromorphie et de salure de nappe fréquents dans les plaines situées à plus de 600 mm.

La plus grande partie étant sous climat sahélien est couverte des formations steppiques adaptées aux pH élevés (*Acacia raddiana*, *Salvadora persica*), aux textures très sableuses (steppes herbeuses vivaces), à la présence d'une nappe point trop profonde (palmeraies à *Hyphaene thebaica*). Plus au sud se produisent quelques substitutions floristiques, des *Parinari* et *Borassus* formant la strate phréatophile, des *Andropogonées* soudaniennes remplaçant les *Aristidées* vivaces. Seules les plaines des « Dallols » sont cultivées (arachide et millet).

### *Evolution récente et subactuelle des matériaux très sableux*

Le bilan des acquisitions pédologiques de ces matériaux très sableux et récents est la meilleure estimation que nous ayons des pédogenèses récentes et subactuelles. Il diffère selon le régime hydrique estimé.

#### DRAINAGE LIBRE

— les taux et la répartition de la matière organique sont les mêmes que dans les sols des séquences à sols rubéfiés les moins évolués (F. 2) à pluviosité égale.

— le solum est enrichi en fines et en sesquioxydes de fer dont il contient respectivement de 2 à 6 % et de 0,3 à 1 %.

— à plus de 400-500 mm apparaît un horizon (B) légèrement coloré (7,5 YR 5/4-6), légèrement enrichi en sesquioxydes de fer (rapports B/C et B/A de 1,3), dans les sols les moins récents (S. 3a).

— le développement structural est le seul fait de celui des racines qui divisent l'épipédon en mottes « nuciformes », le reste du profil étant particulière au sens strict.

— le profil reste saturé dans nos limites climatiques (250-550 mm).

Les sols ainsi formés sont :

— pour la génération S. 3a de la marge de TAL des sols bruns subarides épais de 150 cm pour 400 mm de pluies. Au-delà le profil A-C se transforme en A-(B)-C, amorçant une évolution vers les types rubéfiés les moins différenciés (F. 1).

— pour la génération S. 3b des sols subarides bruns de 60 cm au plus à 500 mm de pluies. Ces profils A-C s'amenuisent avec la pluviosité et, la fréquence des remaniements éoliens augmentant, se transforment en sols peu évolués, en sols gris subdésertiques à croûtes organiques, en sols eoliens.

#### DRAINAGE LIMITÉ

On considère ici les sols de plaines, de pieds de cordons, qui dans le passé furent atteints par un niveau phréatique à une profondeur modérée (plus de 120 cm) et qui

peuvent encore recevoir un appoint latéral d'eau. Les mécanismes y diffèrent par :

- une action de nappe ayant pu aller jusqu'au concrétionnement ;
- la formation de raies discrètes ;
- une concentration d'argile dans un horizon (B) légèrement coloré (brun vif 7,5 YR à 5 YR 4/4) également plus riche en fer une fois sur deux ;
- une désaturation du profil croissant avec la pluviosité, les bases se concentrant dans l'épipédon.

Les profils correspondants des vallées sèches sont de type A-(B)-C(g) et évoluent vers les types « brunis », à action de nappe en profondeur, des sols ferrugineux peu lessivés récents (F. 2).

#### DRAINAGE TRÈS LIMITÉ

Pour des profondeurs de nappe comprises entre 60 et 120 cm se forment des profils A-C(g) gris foncé (10 YR, chroma 1) à base décolorée blanche. Leurs caractéristiques ne varient guère après le retrait de la nappe, si ce n'est que les ségrégations ferrugineuses finissent par disparaître et que les taux de matière organique diminuent.

#### SIGNIFICATION DES SOLS BRUNS SABLEUX

Les sols bruns sableux sont essentiellement des sols peu évolués qui n'ont pas encore dépassé le stade A-C, quelque soit leur drainage, du fait de leur jeunesse et d'un matériel presque entièrement quartzeux. Les processus à expression forte à l'origine des sols ferrugineux ne s'y manifestent pas ou guère. Sur la formation de TAL vieille d'environ cinq millénaires ils disparaissent complètement à moins de 400 mm de pluies et à 600 mm de pluies ils ne réalisent que des profils A-(B)-C approchant des types les moins différenciés et rubéfiés de la famille 1. Les processus à expression faible qui les caractérisent sont identiques en milieu bien drainé à ceux des faciès subarides des sols évolués : accumulation de type décroissant d'une matière organique relativement riche en acides humiques gris et bruns, absence de désaturation, accroissement du taux de plasma minéral dans le solum. Les sols moins bien drainés convergent rapidement vers la même organisation après effacement, lors du retrait de la nappe phréatique, d'une partie de leurs caractéristiques originales : taux de matière organique plus élevé, désaturation hors des aires salées, redistribution des hydroxydes de fer et parfois des carbonates.

Finalement, l'âge et la pluviosité décroissant, les paysages psammiques se sont couverts, tant à partir des crêtes que des fonds, de sols bruns tenant aux sols peu évolués par leur profil A-C, aux sols subarides par leur réaction et leur type de matière organique.

**LES SOLS HYDROMORPHES  
LES SOLS ALLUVIAUX,  
LES VERTISOLS HYDROMORPHES  
ET LES SOLS SALÉS PAR L'ÉVAPORATION  
D'UNE NAPPE**

*Données générales*

**DÉFINITION**

Dans ce chapitre sont regroupés des sols pour la plupart récents, à profils médiocrement différenciés A - C ou A - (B) - C, à évolution dominée par des processus liés à un excès d'eau d'origine externe. Ils forment un ensemble présentant des affinités et voisinant sur le terrain avec des groupements à hydromorphie, halomorphie ou caractères vertiques subordonnés appartenant aux autres classes. Les sols à hydromorphie « pétrographique » (p. 48) en ont été séparés à cause de leurs fortes ressemblances avec les sols ferrugineux lessivés.

**SITES DE L'HYDROMORPHIE**

Les sols anciens ne montrent que de l'hydromorphie secondaire subordonnée à des pédogenèses à sols lessivés, tirsifiés, halomorphes, en proportion croissante dans le temps, d'un modelé à l'autre ainsi que des roches perméables aux roches imperméabilisables par altération ou par délapidification. A peu près nulle dans les séquences à sols faiblement ferrallitiques des hauts modelés sur grès (Ct. 3) elle prend de l'importance sur les glaciis ferrugineux indurés ou concrétionnés puis s'étend à la plus grande partie sinon à la totalité des bas modelés à altération argileuse.

L'hydromorphie primaire n'apparaît qu'ensuite, dans les remblais, formations sableuses associées à la désorganisation des réseaux hydrographiques lors des épisodes arides. Elle s'y manifeste par des actions de nappe à la base de sols ferrugineux pour la plupart (p. 75), généralement inactuelles dans le domaine sahélien. La majorité des sols hydromorphes est située sur des alluvions plus récentes, aux phases argileuses étendues, des lits majeurs, des mares sahéliennes, de

la partie de la cuvette tchadienne située en aval de la formation péri-lacustre de 320 m. Ils ne sont plus régulièrement inondés sur la totalité de leur surface que dans la zone soudanienne. Il existe enfin des sols alluviaux actuels moins fins et plus hétérogènes issus par des intermédiaires proluviaux et colluviaux des produits d'une érosion accélérée (bassin des Maggia, du Goulbi de Maradi, du versant occidental du Niger).

#### LES MODES D'ENGORGEMENT

L'engorgement pluvial dû à l'imperméabilité du sol produit une lame d'eau de quelques centimètres disparaissant en quelques heures. Ses effets ne sont discernables que sur les glacis qui ne sont pas autrement inondés : structures élargies, traces de pseudogley.

L'engorgement par épandage se prolonge pendant quelques jours par an, la lame d'eau atteignant quelques décimètres. Il est dû à l'afflux d'eaux de ruissellement peu canalisées dans les grandes vallées sahéliennes, soit sur d'anciens flats argileux, soit sur des proluvions et alluvions actuelles à sols alluviaux.

La crue locale envahit les lits majeurs de juillet à octobre de un ou plusieurs mètres d'eaux boueuses. Elle ne se propage sur de longues distances que sur les rivières ayant leur source au sud du territoire : Niger et ses affluents occidentaux, Komadougou, Goulbi de Maradi. La crue soudanienne aux eaux claires se propage le long du Niger de janvier à mars.

L'inondation par retenue se prolonge diversement en saison sèche derrière les barrages dunaires, des bouchons alluviaux (mares du Beli), dans les biefs argileux des lits majeurs. Au delà de janvier elle donne du gley de surface et fait disparaître la strate ligneuse.

La nappe de la cuvette tchadienne et, dans une certaine mesure, celle des grandes vallées mortes des grès, possède les caractéristiques des nappes des zones de subsidence (KOUNINE, in SCHOELLER, 1959) : magasin meuble épais, surface libre étendue, zone d'alimentation éloignée, alimentation locale n'intervenant que pour former des lentilles douces dans une région à eaux plus salées. Jadis présente à moins de 350 mm, elle ne réapparaît plus que vers 400 à 500 mm au-delà desquels elle sale ponctuellement des sols jusqu'à 800 mm de pluies. FAURE (1965-1966) a montré que cet abaissement phréatique pouvait être suivi depuis un optimum Holocène (10.000 BP) par un palier Néolithique (5.500 BP) et par le recul vers le sud des saulniers (1750 A.C.).

Les nappes sous-alluviales des autres dépressions appartiennent au type des « plaines structurales », de faible extension, à eaux de composition très variable et d'origine locale. Leur abaissement est également probable car elles ont abandonné les remblais, que le thalweg ait été réincisé ou pas.

#### VÉGÉTATION ET UTILISATION

La végétation est spécialisée selon l'intensité de l'engorgement, sa nature et la texture du sol, ces facteurs n'étant pas totalement indépendants. L'engorgement pluvial ou par épandage ne modifie pas la végétation qui reste celle des séquences

bien drainées voisines ou chimiquement et texturalement apparentées, à l'exception des flats argileux légèrement salés de l'Azaouak couverts d'une prairie rase et éphémère. L'engorgement par crue favorise d'abord le développement de formations boisées à espèces les unes banales, les autres climatiquement décalées (*Anogeissus*, *Isoblerlinia*, *Faidherbia*), quelques unes spécialisées (*Myragynes*). Lorsque les textures s'alourdissent et que la crue se prolonge apparaissent successivement des bois armés à mimosées (*Acacia campylacantha*, *Nilotica*, *Mimosa asperata*) puis des prairies vivaces d'abord dressées (*Vetivers*, *Panicum*) puis prostrées et enfin flottantes (*Echinochloa*, *Oryza*). Les formations phréatophiles, généralement sur sols sableux, sont des palmeraies à Borassus au sud, *Hyphaene* au nord, diversement complétées de *Vitex*, *Celtis*, *Parinari*. Les prairies à *Sporobolus* indiquent la salure ainsi que les bosquets de *Tamarix* des accumulations de poudres salées (*Manga*).

Les sols engorgés sont généralement fertiles et cultivables mais ne sont occupés que sporadiquement, faute de maîtrise des techniques de petite hydraulique. Les sols arrosés par épandage ne sont cultivés (sorgho, coton) que dans les Maggia. Les rizières du Niger ne sont qu'une petite partie des alluvions régulièrement inondées. Même la culture de décrue sur argile détrempée (sorgho) est relativement peu développée. Ce sont les terres irrigables en saison fraîche à partir de la nappe, des rivières ou des retenues qui sont les plus largement utilisées, avec le plus de diversité : blé dur (argiles), légumes, tabac, canne de bouche (sables). Des pâturages de saison sèche occupent le reste.

### *Sols hydromorphes et halomorphes récents*

#### EFFETS DES DIVERS MODES D'ENGORGEMENT

##### *Engorgement de surface ou d'ensemble par crue ou par inondation de retenue*

Les taux de matière organique croissent en fonction de la durée de l'engorgement et de la texture. Les maxima (20-30 % et 16-18, respectivement) sont atteints dans les anmoors acides des sols à gley humiques noirs du sud de la vallée du Niger où la crue se prolonge longtemps en saison sèche. Ailleurs, surtout dans les mares sahéliennes, cette dernière interrompt le développement végétatif et les sols sont plus clairs, gris et bruns, avec des taux modestes d'une matière organique bien évoluée, plus élevés sous les bois et forêts (3-1,5 %, C/N : 6,5-11) que sous prairies (0,9-2,2 % et C/N : 6,5-9,5).

Les hydroxydes de fer sont redistribués et tendent à s'accumuler à la base des horizons A à pseudogley ou gley. Sans être impossibles le lessivage et l'appauvrissement en argile n'ont pas été observés dans cet ensemble.

Les coefficients de saturation, les pH, les taux de sels et de sodium sont toujours abaissés, les eaux non liées aux nappes étant douces partout. Il existe une relation géographique directe entre les pH et les capacités d'échange, les bassins les plus arrosés étant aussi ceux où les séquences kaoliniques désaturées dominent. Il est possible que cet équilibre entre le milieu et la minéralogie existe encore au niveau des horizons, le gley acide s'accompagnant de capacités d'échange plus faibles.

Le développement pédique et la stabilité structurale dépendent de la permanence d'une végétation dense. Ils croissent avec l'engorgement jusqu'au gley dans les flats ou se différencient des horizons à anmoor sous une prairie permanente. Leur maximum s'arrête au contraire au pseudogley sous forêt dans les alluvions dont les termes les plus engorgés sont des sols à gley très instables gris desséchés en saison chaude. Alors la dispersibilité élevée du plasma minéral peu lié à la matière organique se concrétise par des structures polyédriques, cubiques, prismatiques dont la grossièreté croît avec la durée de l'engorgement. Les argiles noires et les structures vertiques sont fréquentes mais sont incompatibles dans le même horizon avec un gley prononcé.

#### *Engorgement de surface par épandage pluvial*

Il produit un pseudogley atténué, une accumulation faible de matière organique (0,55-0,8 %, C/N de 7,5-10), des structures grossières souvent laminaires. L'acidité superficielle disparaît. Un régime exsudatif redistribue le calcaire de matériaux ou d'anciens horizons carbonatés pour des pluviosités ordinairement faibles, sahéliennes, atteignant cependant 620 mm dans la cuvette tchadienne (DUNGASS).

#### *L'engorgement de profondeur ou d'ensemble par nappe*

Les valeurs très élevées de l'ETP font que ce mode d'engorgement est dominé par des phénomènes de concentration. Dans les alluvions argileuses à nappes peu étendues les traits produits ressemblent beaucoup à ceux de l'hydromorphie confinée des séquences mieux drainées locales : nodules ferrugineux anastomosés, concrétions manganésifères sphériques, horizons à amas ou nodules calcaires en voie d'homogénéisation verticale. Dans les alluvions des dépressions à nappe extensive, généralement plus sableuses les traits sont plus spécifiques, concrétionnement ferrugineux tubulaire (p. 75) et salure.

La plupart du temps la nappe est peu salée, le profil sableux et homogène. Les carbonates de calcium et magnésium précipitent dans la masse de sol en pseudomycélium, amas, nodules, croûtes friables, alors que les sels solubles (carbonates, sulfates, rarement chlorures de Na, K, Mg) forment des efflorescences superficielles. Généralement le lessivage pluvial contient ce processus dans des limites qui ne lui permettent guère de transformer le profil hydromorphe ni de spécialiser la végétation. Dans quelques sites de bords de mares phréatiques, qui peuvent descendre jusqu'à 875 mm de pluies, la matière organique peut être dissoute par les carbonates alcalins et même disparaître complètement de l'épipédon qui est alors jaune et fortement alcalisé (0,75 mmhos/cm pour l'extrait 1/10, pH 8,5-10). Dans les régions où la nappe est actuellement très profonde on interprète des sols A-C gris et bruns plus ou moins marmorisés à concentrations calcaires comme d'anciens sols halomorphes lessivés de leurs sels solubles.

L'évaporation des lacs phréatiques produit des saumures et des sols à encroûtement salin, à gley sulfureux, à cristaux intercalaires de carbonates et sulfates de sodium, à amas abondants de carbonates de calcium et de magnésium. Le potentiel d'oxydo-réduction et les taux de gaz carbonique y déterminent un équilibre entre les hydroxydes de fer et les sulfates alcalins d'une part et les sulfures de fer et les carbonates alcalins de l'autre. Les « limons » calcaires associés à des sables à sulfures des alluvions palustres et lacustres inactuelles sont vraisemblablement des reliques de

sols à encroûtement salin de ce type, tous différents des sédiments biologiques, calcaires purs et diatomites, des mêmes sites.

Le sodium étant le plus abondant dans la nappe, l'alcalisation du complexe absorbant est parallèle à l'accumulation saline. Elle est maximum au sommet des sols encore traversés par le flux capillaire, sinon à une profondeur déterminée par la pluviosité et la texture. La grossièreté des structures et leur instabilité, très élevée, s'étend à tout le profil et à tous les sols d'un même système alluvial, indépendamment du taux relatif de sodium, ou même de tout autre cation dispersant (K, Mg). La fixation de l'ensemble de ces derniers, et à fortiori l'alcalisation, est une condition suffisante mais non nécessaire d'une forte dispersibilité. Il reste que toutes deux ont été acquises dans un matériel soumis à un moment de son histoire à une accumulation saline.

## LES TYPES DE SOLS

### *Les sols peu évolués d'apport mal drainés (alluviaux)*

En régime d'épandage de crue ce sont des empilements de profils Ag - Cg élémentaires conservant la couleur des sols d'emprunt. En régime de crue un meilleur classement granulométrique, des niveaux de pseudogley et gley mieux formés limitent cet héritage, encore très appréciable, aux constituants, à la saturation, à la répartition des bases.

### *Les sols hydromorphes minéraux à gley ou pseudogley de surface ou d'ensemble*

Ils se forment sur les alluvions de lit majeur de textures moyennes par l'effet de la crue annuelle et de la nappe sous-alluviale. Les profils sont de type A (g ou G) - (B) g - (g ou G) ox cn, avec un horizon médian toujours mieux structuré et aéré, une base évoluant soit vers une « plinthite » massive soit vers un matériel smectitique marmorisé.

### *Les sols hydromorphes vertiques*

Leur matériau est l'argile gonflante des biefs et des retenues. Selon la durée de l'engorgement ils forment des ensembles continus allant des vertisols hydromorphes aux sols à gley de surface, gris et noirs.

Les séries grises des sols à gley vertiques sont caractéristiques des mares et biefs sahéliens. Leur profil synthétique :

A. G - (B) vv marmorisé - G v ca sn cn (marmorisé parfois) répète l'opposition déjà notée entre des horizons supérieurs désaturés et gris (IO YR 5-6/1), largement prismatiques, et des horizons profonds plus bruns et homogènes, gonflants, à concentrations calcaires ou sodiques.

Les séries noires du flat du Niger (10 YR 2-3/0) sont plus acides et organiques et font transition avec quelques sols à gley humiques.

Les vertisols topomorphes ou hydromorphes n'ont pas de ségrégations dans l'épipédon ni de gley à la base, leur partie moyenne pouvant être marmorisée. Ils sont

bruns et homogènes, pauvres en matière organique, peu ou pas désaturés en surface. Leurs structures sont les mêmes, avec un retrait plus faible.

#### *Les argiles noires calcaires et/ou à alcalis*

Elles évoluent en régime actuel d'épandage sur des alluvions fluviales ou palustres d'aires à niveau phréatique jadis élevé (cuvette tchadienne, vallées sèches). Les profils, foncés (IO YR 3-4/1-2) sont de type :

A - (B) ca - C ca sn cn

Le calcaire est disposé en voiles pseudomycéliens, en nodules ou en amas. Le développement pédique, prismatique et polyédrique, parfois cubique, est plus faible que dans les vertisols, sans formes de gonflement nettes.

#### *Les sols hydromorphes minéraux sableux à engorgement de nappe*

Tous se ramènent au profil A - C (g) dont l'horizon humifère, brun, gris ou noir, repose sur des sables décolorés, quelquefois par l'intermédiaire d'un horizon jauni et/ou concrétionné, plus rarement à nodules calcaires. Le gley ferreux y apparaît parfois dans des inclusions plus argileuses ou organiques. Ils sont désaturés mais après retrait de la nappe acquièrent les pH correspondant à la pluviosité du lieu.

#### *Les sols salins*

Leur organisation passe par degrés de celle des sols à efflorescences neutres (Mg, Na, Cl, SO<sub>4</sub>) :

sa - A - C (g) qui conserve le profil et l'acidité des sols de nappe sableux à celle des sols salins à encroûtement :

sa - (A) sa ca.

sa - (A) sa ca - à gley ferreux et sulfureux sur des matériaux plus complexes et argileux.

#### *Les sols peu évolués calcaires*

Ils seraient des reliques de l'ensemble précédent, actuellement humectés par épandage seulement. Le calcaire, contenu dans des horizons profonds parfois encroûtés dans les alluvions les plus vieilles, est redistribué dans les horizons superficiels qui peuvent acquérir la structure fine des sols calcimorphes.

#### *Conclusions*

Les effets de l'excès d'eau consistent en un accroissement de l'accumulation organique, en redistributions et concentrations d'hydroxydes et de sels, en agradation (simatisation) ou dégradation (ferrolyse ? BRINKMAN, 1970) du complexe absorbant, se combinant en un petit nombre de types selon l'âge, l'intensité de l'engorgement et le chimisme local :

- profils A-C, diversement marqués par le Gley et le Pseudogley.
  - = sols acides des milieux ouverts (engorgement par crue) ou pauvres en bases.
  - = sols à concentrations ferrugineuses, carbonatées ou salines des milieux fermés (engorgement par les nappes de « subsidence »).
- profils A-(B)-C, diversement marqués par le Gley et le Pseudogley
  - = sols acides à horizon (B) de « plinthite » sur matériaux pauvres en bases kaoliniques ou illitiques.
  - = sols à horizon superficiel de Gley acide et à horizon (B) smectitique et/ou carbonaté.
  - = profils à Pseudogley entièrement smectitiques et à affinités vers les Vertisols, les argiles noires diversement carbonatées, salées, alcalisées.
- profils A-C, diversement marqués par le Gley et le Pseudogley.
  - = sols acides des milieux ouverts (engorgement par crue) ou pauvres en bases.
  - = sols à concentrations ferrugineuses, carbonatées ou salines des milieux fermés (engorgement par les nappes de « subsidence »).
- profils A-(B)-C, diversement marqués par le Gley et le Pseudogley
  - = sols acides à horizon (B) de « plinthite » sur matériaux pauvres en bases kaoliniques ou illitiques.
  - = sols à horizon superficiel de Gley acide et à horizon (B) smectitique et/ou carbonaté.
  - = profils à Pseudogley entièrement smectitiques et à affinités vers les Vertisols, les argiles noires diversement carbonatées, salées, alcalisées.

## CLASSEMENT ET HISTOIRE DES ASSOCIATIONS DE SOLS DU NIGER MÉRIDIONAL

### *Classement*

#### PRINCIPE

Les « paysages » pédologiques tels que nous les avons initialement définis et successivement décrits sont vraisemblablement des unités dynamiques dont les éléments topographiques, biocénotiques et édaphiques évoluent ensemble. Ces transformations liées ou parallèles sont en grande partie réglées par des combinaisons définies de processus qui peuvent servir de base à un classement des associations de sols considérées comme des corps pédologiques. Le degré de complexité de ces ensembles et la part que les translocations y prennent en donnent les premières subdivisions, les autres étant fondées sur des processus jugés moins importants ou sur le degré de développement des sols.

#### TOPOSÉQUENCES À ÉVOLUTION SIMPLE

Un ou deux processus dominant dans la pédogenèse. La minéralogie des argiles est stable dans le temps et dans l'espace. Les profils résultants ne sont pas très éloignés dans la classification. Les processus caractéristiques sont associés à un constituant surabondant, argile ou quartz, le plus souvent hérité d'altérites anciennes ou de roches (au Niger). Ces paysages peuvent déborder largement la zone climatique qui est habituellement réputée celle des processus en cause. Leur relative stabilité dans le temps justifie l'hypothèse classique qui attribue tout changement de paysage pédologique important qui n'est pas d'ordre lithologique à quelque événement climatique ou géomorphologique majeur.

#### *Toposéquences avec lessivage de l'argile et du fer*

A. II - lessivage de l'argile et du fer + appauvrissement subordonné + lixiviation des bases + ferritisation des horizons B + hydromorphie secondaire.

Les séquences sont à sols ferrugineux lessivés et à sols hydromorphes acides. Elles sont subdivisables selon le degré de ferritisation de l'horizon B en cuirasses ou concrétions et le degré d'hydromorphie. Elles sont représentées au Niger par des cuirasses ferrugineuses (p. 34) et par des toposéquences non indurées (p. 42), toutes sur matériel kaolinique.

A. 12 - lessivage et appauvrissement + lixiviation + rubéfaction des horizons B + ferritisation et hydromorphie secondaires plus modérées et strictement localisées au bas de pente. Perméabilité meilleure du fait de :

12. 1 : formation de micro-peds d'argile (kaolinite) et d'hydroxydes de fer. Toposéquences à sols faiblement ferrallitiques, sols ferrugineux lessivés rubéfiés, sols hydromorphes acides (p. 46).

12. 2 : un bon drainage interne dû à la texture. Unité de transition avec la suivante (F. 0, p. 77).

A. 13 - lessivage et appauvrissement ou simple enrichissement en plasma minéral du solum par rapport au matériau - rubéfaction en haut de pente, brunissement en bas de pente - ferritisation uniquement par nappe et non associée à des volumes structuraux - hydromorphie toujours externe.

Ce groupe de processus est déterminé par un taux excessif de quartz. La nature de l'argile est indifférente vraisemblablement, encore qu'elle soit le plus souvent de la kaolinite. Il produit les sols ferrugineux peu lessivés (p. 77).

#### *Toposéquences sans lessivage de l'argile et du fer*

A. 21 - association mélanique et orientée de la matière organique et d'une argile gonflante (« tirsification », « argile noire ») + fort développement pédique + pédoturbation (« vertisol ») + nodulation calcaire + hydromorphie secondaire.

Ce sont les séquences à sols bruns eutrophes, vertisols, sols hydromorphes vertiques dont le minéral caractéristique est une smectite héritée ou produite par l'altération (p. 57). Il en existe une variante calcaire (p. 64).

A. 22 - aux processus précédents s'ajoute l'appauvrissement superficiel (p. 61) et la rubéfaction.

Sols rubéfiés eutrophes (« fersiallitiques », « brun-rouge » de glaciés), sols bruns eutrophes, vertisols, sur smectites « dégradées » ou mêlées d'argiles 1:1 en haut de pente (transition avec l'ensemble suivant).

#### TOPOSÉQUENCES À ÉVOLUTION COMPLEXE

Les constituants varient fortement le long de la toposéquence et dans le temps. L'effet en retour de la différenciation des sols sur la pédogenèse est très important. Les termes sont éloignés dans la classification. Les uns, éluviaux, sont assimilés aux profils amont des toposéquences à lessivage ; les autres, illuviaux, ressemblent aux termes médians ou aval des toposéquences sans lessivage. En fait les combinaisons de caractères s'éloignent plus ou moins des normes classiques de telle sorte qu'un très grand nombre de sols se situent mal dans la classification. Des transformations du paysage peuvent être assez importantes pour être confondues avec les effets de variations climatiques ou tectoniques.

B. 1 - lessivage de l'argile et du fer + appauvrissement + lixiviation des bases + smectitisation + nodulation calcaire + halomorphie et hydromorphie secondaire.

La toposéquence : sols ferrugineux lessivés - solonetz solodisé - vertisol, découverte et définie par BOCQUIER (1965) au Tchad, rend vraisemblablement compte de l'essentiel des toposéquences à sols halomorphes sur matériaux à argiles gonflantes alcalisées du Niger (p. 51). Les constituants en varient de la kaolinite aux argiles gonflantes.

B. 2 - hydromorphie pétrographique et secondaire + lessivage de l'argile et du fer + lixiviation des bases + smectitisation + nodulation calcaire.

Les successions à sols hydromorphes lessivés (parfois à sols ferrugineux lessivés hydromorphes) et sols à gley vertiques (p. 48) sont propres aux schistes illitiques.

#### TOPOSÉQUENCES À SOLS PEU DIFFÉRENCIÉS

Elles sont formées d'une majorité de profils A-C et de quelques profils A-(B)-C développés sur des matériaux récents, non rubéfiés quel que soit le drainage. Ce sont soit des sols bruns (p. 83), soit des sols hydromorphes et halomorphes (p. 86) montrant parfois des tendances évolutives vers les séquences A. 1 et B.

#### LES FACIÈS SUBARIDES

En milieu sahélien toutes les séquences manifestent des modifications de surface traduisant un rapport moins favorable entre la pédogenèse et l'érosion superficielle. Les faciès subarides des épépédons sont caractérisés par une épaisseur plus faible, une moindre richesse organique, des structures litées ou particulières, selon les agents physiques érosifs dominants. Ils déterminent les sols subarides brun-rouge et bruns des séquences A. 122 et A. 13, les « sols brun-rouge de glacis » des séquences A. 22, les « sols bruns tirsifiés » des séquences A. 2. Ils existent également dans les séquences A. 11', sans dénomination particulière, et dans les séquences B, avec une terminologie non assise : sols solonetziques, « sols bruns alcalisés ».

#### *Histoire*

L'acquis pédologique pré-quatenaire est considérable et consiste en roches et matériaux très évolués : grès kaoliniques et arkosiques du continental intercalaire et hamadien, puissante altérite kaolinique paléocène, grès kaoliniques et ferrugineux néogènes en dérivant.

Le début du Quaternaire est conventionnellement défini par un cuirassement très étendu scellant une pénélaine s'étendant du bassin Mio-Pliocène à ses bordures du socle et du Crétacé continental. Bien que ferrugineux il se distingue des cuirassements plus tardifs par son épaisseur considérable (10 m), par son invariance latitudinale et topographique, par sa micro-structure évocatrice d'un solum ferrallitique, d'une ferritisation dissociée des mouvements de l'argile, par une forte altération des quartz associée à celle d'une partie de la kaolinite du matériau. Ces caractères sont attribués à un pédoclimat plus humide qu'aucun de ceux qui suivront.

Le Quaternaire proprement dit est conçu comme une succession de périodes pédologiques caractérisées chacune par le même degré d'évolution des sols prépondérants et comprenant un ou plusieurs « cycles » climatiques alternant des phases de pédogenèse de moins en moins actives et des phases d'érosion à hydraulicité de plus en plus réduite. La combinaison de ces fluctuations avec un abaissement du niveau de base a produit dans les régions surélevées des modelés étagés aux sols d'autant moins différenciés qu'ils sont plus bas. Dans la cuvette subsidente tchadienne les sols sont uniformément juvéniles.

Une première période pédogénétique a laissé des cuirasses actuellement perchées, restes de glacis et de dépressions étagées au-dessous de l'ancienne pénéplaine. Ce sont des horizons B indurés de séquences à sols ferrugineux lessivés, très localement ferrallitiques en des sites élevés sur grès de l'extrême Sud du Niger. Le cuirassement est deux à trois fois moins épais que sur la pénéplaine mais est encore peu sensible au gradient latitudinal entre 250 et 875 mm de pluies actuels, ce qui indique une pluviosité ancienne encore très forte. Les structures indiquent des translocations associées des argiles kaoliniques et des hydroxydes de fer ainsi qu'une forte hétérogénéité du squelette minéral. Cette dernière s'exprime macroscopiquement par des horizons graveleux s'achevant en terrasses à galets à la base des glacis et versants. Sur le socle cet ensemble se subdivise en deux modelés successifs étagés (M. 1a et M. 1b) alors que sur les grès il paraît unique.

La seconde période pédogénétique a laissé des modelés encore fonctionnels sur leurs parties versantes et établis au niveau du vieux front d'altération Paléocène sur le socle. Dans les sols, dont au moins une partie des processus de formation est encore actuelle, la ferritisation ne dépasse pas en moyenne le stade concrétionné ; le gradient latitudinal, pour la première fois très sensible, et vraisemblablement deux « cycles » font se succéder du sud au nord deux paysages distincts entre lesquels toutefois peuvent exister des liaisons génétiques empêchant une séparation trop tranchée. Il existe partout, mais inégalement développée selon le substrat et le type de pédogenèse, une nappe ou horizon graveleux à la base du solum, formant une minime terrasse en bas de pente. Au sud les pentes portent des restes de séquences à sols ferrugineux lessivés à concrétions, localement cuirassés. Ce paysage (M. 2) s'amenuise vers le nord en se restreignant aux sommets d'interfluves puis disparaît. Il est alors remplacé par des glacis argilisés dont les caractères expriment mieux un changement profond de la pédogenèse attribué encore à une réduction de la pluviosité (M. 3). L'agressivité réduite des agents de l'altération s'y exprime par une dépendance réelle et multiple des sols à l'égard de la roche-mère et du matériau :

- séquences à sols ferrugineux lessivés sur argilites ou vieilles altérites kaoliniques.
- séquences à sols hydromorphes lessivés sur shales à hydromicas.
- séquences à sols ferrugineux, solonetz, vertisols sur matériaux smectitiques sodiques en partie issus de roches plagioclasiqes alcalines et calco-alcalines (socle et grès arkosique).
- séquences à sols bruns eutrophes et vertisols sur matériaux à smectites calciques, parfois calcaires, hérités d'argilites, de marnes ou produits par l'altération de roches basiques.

La fin de cette période, qu'il serait possible d'isoler en donnant plus de poids à ses incidences sédimentologiques (GAVAUD, 1970), est marquée moins par l'atténuation de la pédogenèse que par la mise en place de matériaux particuliers. Elle débute par une désertification prononcée qui tronque les sols et fossilise leurs restes par des dunes (E. 1) atteignant au Niger l'isohyète 875 mm. Les horizons grossiers sont largement remaniés en regs et localement repris en graviers fluviatiles. Ces derniers sont recouverts d'un remblai de tarissement finement sablo-argileux, plus rarement argileux. La phase pédogénétique suivante reconstitue les sols des bas-modelés (M. 3) au-dessus des regs et forme des séquences à sols ferrugineux peu

lessivés sur dunes et remblais au moins jusqu'à la limite actuelle du désert. Des dépôts carbonatés de nappe ou de source se déposent aux pieds des versants calcaires ou en bordure de la cuvette tchadienne. La pédogenèse est interrompue par une récurrence désertique qui met en place un second erg (E. 2) remaniant le précédent jusqu'à l'isohyète de 650 mm. Elle reprend ensuite en donnant des sols ferrugineux peu lessivés moins différenciés ainsi que quantité de vertisols, de sols hydromorphes et halomorphes sur les dépôts argileux, plus rarement biochimiques (cuvette tchadienne) qui envahissent lits majeurs et dépressions postérieurement à la mise en place de l'erg E. 2.

La durée de la troisième et dernière période peut être approximativement évaluée à cinq ou six millénaires par l'âge des sols les plus anciens de la formation périlacustre de 320 m. La baisse des niveaux phréatiques, l'assèchement des lacs ne s'accompagnent pas d'un retour du désert mais de fluctuations suffisamment sèches pour remodeler les dépôts les plus sableux et les plus récents en cordons de rives ou de plages, en nekka. La pédogenèse rubéfiante disparaît des sites les plus septentrionaux du cordon de 320 m et totalement du cordon de 287 m. Il ne se forme plus que des sols bruns. L'hydromorphie et l'halomorphie de nappe régressent vers le sud, jusqu'à 450-650 mm actuels. Elles laissent derrière elles des traces telles que des horizons carbonatés, des concrétions ferrugineuses, des limons à sulfures, des vertisols.

Actuellement une différenciation conforme au gradient pluviométrique des épipedons des sols anciens produit les faciès subarides septentrionaux. Les horizons A lessivés tendent à disparaître d'autant plus facilement que le sol était moins désaturé. Ils perdent de leur épaisseur, de leur matière organique, se chargent en bases et acquièrent des structures et des couleurs particulières. La rubéfaction et la translocation du plasma minéral ne produisent que quelques traits mineurs. Les sols sableux sont totalement remaniés par un brassage éolien et hydrique à la limite nord du sahel, les autres sont fortement décapés de sorte qu'il n'existe pas au Niger de zone où les processus subarides aient pu s'exprimer pleinement dans des sols spécifiques.

Le déséquilibre entre le couvert végétal, les pentes et les sols, légué par des climats humides antérieurs, est à l'origine d'une érosion irrépressible souvent déclanchée par des excès d'utilisation à la faveur de fluctuations pluviométriques mineures. Les déplacements de populations dus à ces dernières, à la tendance longue à l'aridification, à des circonstances économiques ou politiques, ont étendu cette situation à tout le Niger bien qu'il soit modérément peuplé. Le capital de sols, déjà réduit par l'extension des aires ferritisées, rabotées par l'érosion désertique et péri-désertique, tend ainsi à se contracter lentement vers les flats et les aires d'épandages alluviales ce qui produit déjà des difficultés locales. L'existence de régions à la fois dégradées et désertes montre que la seule régénération naturelle ne suffit pas à la conservation des sols qui devrait s'appuyer davantage sur une utilisation modérée et rationnelle plutôt que sur le hasard d'abandons prolongés de terroirs.

## BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1965. Classification des sols. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol.*, vol. III, fasc. 3, pp. 279-288.
- AUBREVILLE (A.), 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Soc. Edit. Geo. Marit. Colo. Paris. 357 p.
- AUDRY (P.), 1967. Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous cultures (arachide et pénicillaire). Coll. sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, 1967.
- BOCQUIER (G.), 1964. Présence et caractères de solonetz solodisés tropicaux dans le bassin tchadien. Cong. int. Sc. sol. Bucarest, VIII, t. V, pp. 687-693.  
1967. Biogéocénoses et morphogénèse actuelle de certains pédiments du bassin tchadien. Cong. Int. Sc. sol Adelaide, IX, V, D, 13 p.
- BOCQUIER (G.) et BARBERY (J.), 1965. Carte pédologique de reconnaissance de la République du Tchad, feuille Singako. Centre ORSTOM de Fort-Lamy, 122 p., *multigr.*
- BOCQUIER (G.) et GAVAUD (M.), 1964. Etude pédologique du Niger Oriental. Centre ORSTOM de Dakar, 80 + 267 p., *multigr.*
- BOUCHARDEAU (A.) et LEFEVRE (R.), 1957. Monographie du lac Tchad. ORSTOM, III p., *multigr.*
- BREWER (R.), 1964. Fabric and mineral analysis of soils. J. Wiley, New-York.
- BRINKMAN (R.), 1970. Ferrololysis, a new hydromorphic soil forming process. *Geoderma*, vol. 3, n° 3.
- CHARREAU (C.), 1961. Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *Agron. Trop.*, XVI, 5, pp. 504-561.
- CLAVAUD (G.), 1967. Carte pédologique au 500 000 du bassin versant du Bam-Bam. Centre ORSTOM de Fort-Lamy. 39 p., *multigr.*
- COLLIN DUFRESNE (J.), 1961. Matériaux de construction et produits céramiques au Niger. BCEOM, Nyamey, *multigr.*
- DAVEAU (S.), 1965. Dunes ravivées et dépôts du Quaternaire récent dans le Sahel mauritanien. *Rev. geog. Afr. Occ.*, Dakar, n° 1-2, pp. 7-48.
- DUCELLIER (J.), 1958. Sur la composition des schistes dits argileux. Direction des Mines, AOF, Dakar, *multigr.*
- ELOUARD (P.), 1959. Etude géologique et hydrogéologique des formations sédimentaires du Guebla mauritanien et de la vallée du Sénégal. Thèse, Paris et Mém. Bur. Rech. Geol. Min. n° 7 (1962), 250 p.
- FAURE (H.), 1962. Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger Oriental. Thèse, Paris et *Mém. Bur. Rech. Geol. Min.*, n° 29 (1966), 630 p.  
1965. Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. Congr. INQUA Denver.
- FOURNIER (F.), 1958. Etude de la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Thèse, Paris, *multigr.*, 328 p.
- GAVAUD M., 1968. Les sols bien drainés sur matériaux sableux du Niger. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 3-4, 277-307.  
1970. Les grandes divisions du Quaternaire de régions Ouest-Africaines établies sur des bases pédologiques. Note présentée au Congrès de Géologie Africaine à Ibadan. Centre ORSTOM de Yaoundé, p. 185, 21 p., *multigr.*
- GREIGERT (J.), 1954. Etude hydrogéologique du bassin occidental du Niger. Dir. Fed. Mines Geol. Dakar, *multigr.*  
1957. Introduction à la connaissance hydrogéologique du bassin occidental du Niger. Dir. Fed. Mines Geol. Dakar, *multigr.*
- GREIGERT (J.) et POUJNET (R.), 1967. Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. *Mémoires Bur. Rech. Geol. Min.*, n° 48, 199 p., bibl. 605 réf.
- GROVE (A.T.) et PULLAN (R.A.), 1963. Some aspects of the Pleistocene paleogeography on the south side of the Sahara. African ecology and human evolution. Viking Fund Publications in Anthropology, n° 36.
- JEAMBRUN (M.) et MACHENS (E.), 1962. Prospection générale du Liptako (République du Niger). Bur. Rech. Geol. Min., rapport 63-A, Dakar, *multigr.*
- LAKTIONOV (B.I.), 1961. Nature of the high dispersity of solonchetic soils and methods for their chemical amelioration. *Soviet Soil Sci.*, 6 (juin 1962), 635-641.
- MAIGNEN (R.), 1958. Le cuirassement des sols en Afrique tropicale de l'Ouest. Thèse, Strasbourg. *Mémoires de la carte géologique d'Alsace et Lorraine*, n° 16, 239 p.
- MICHEL (P.), 1959. L'évolution géomorphologique des bassins du Sénégal et de la Haute Gambie. *Rev. Géom. Dynam.*, X, n° 5-12, pp. 117-143.  
1970. Chronologie du Quaternaire des bassins des fleuves Sénégal et Gambie. *Bull. ASEQOA*, Dakar, n° 25, 53-64, n° 26, pp. 25-37.
- PEDRO (G.), 1964. Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. *Ann. Agron.*, 15 (2), 85-191 et 15 (3) 243-333 et 15 (4) 343-456.

- PIRARD (F.), 1964. Reconnaissance hydrogéologique du Niger Oriental. *Bur. Rech. Geol. Min.*, Dakar, 109 P.
- REICHEL (P.), 1961. Géologie et hydrogéologie de la bordure sud-est du Gourma (République du Niger). *Bur. Rech. Geol. Min.*, DAK 62, A 29.
- SCHNEIDER (J.L.), 1967. Evolution du dernier lacustre et peuplements préhistoriques des Pays-Bas et du Tchad. *Bull. ASEQOA*, n° 14-15, 18-23.
- SCHOELLER (H.), 1959. Progrès récents dans l'hydrologie de la zone aride. Publ. UNESCO, Paris.
- SERVANT (M. et S.), 1970. Les formations lacustres et les diatomées du Quaternaire récent du fond de la cuvette tchadienne. *Rev. Geogr. Phys. et de Geol. Dyn.*, (2), vol. XII, fasc. I, 63-76.
- SCHUMM (S.A.) et HADLEY (R.F.), 1961. Progress in the application of landform analysis in studies of semi-arid erosion. *Geol. Surv. Circular 437*, U.S. Dep. of Interior, Washington.
- TURK (L.), 1955. Le bilan de l'eau dans les sols. *Annales Agronomiques*, sér. A, n° 4.
- URVOY (Y.), 1942. Les bassins du Niger. Mémoires de l'IFAN, n° 4, 139 p.
- VOGT (J.), 1959. Aspects de l'évolution morphologique récente de l'ouest africain. *Annales de Géographie*, n° 367, pp. 193-206.
- WACKERMANN (J.M.), 1967. Les faciés pétrographiques de la Série de Mako dans les régions de Kanemere et de Mamakono (Sénégal Oriental). Centre ORSTOM de Dakar, 34, p., *multigr.*
- WHITE (E.M.), 1964. Relations entre la morphologie et le chimisme de quelques sols solodisés à horizon A mince issus de matériaux modérément fins de pentes bien drainées. *Soil Sci.*, vol. 98, n° 4, 256-263.

## SOMMAIRE

PRÉSENTATION .....	5
LE MILIEU NATUREL .....	7
<i>Situation géographique</i> .....	7
<i>Le climat</i> .....	8
<i>La géologie</i> .....	13
<i>Le modelé</i> .....	17
<i>La végétation</i> .....	18
<i>L'utilisation des sols</i> .....	21
LE MANTEAU D'ALTÉRATION KAOLINIQUE .....	23
<i>Généralités</i> .....	23
<i>Les kaolins sous cuirasses</i> .....	23
<i>Les kaolins sous grès</i> .....	24
<i>Autres altérations kaoliniques</i> .....	25
<i>Les lacunes dans l'extension du manteau kaolinique</i> .....	26
<i>Conclusions</i> .....	26
LA CUIRASSE SUPÉRIEURE .....	28
<i>Les sites</i> .....	28
<i>Caractéristiques</i> .....	30
<i>Les sols ferrugineux de la vieille surface</i> .....	32
<i>Conclusion : les variations de la pédogenèse sur la surface supérieure</i> .....	33
LES CUIRASSES FERRUGINEUSES .....	34
<i>Les sites</i> .....	34
<i>Caractéristiques</i> .....	35
<i>Cailloutis et conglomérats</i> .....	38
<i>Les horizons meubles relictuels</i> .....	39
<i>Conclusions : les variations de la pédogenèse sur les modelés à sols ferrugineux lessivés indurés ou concrétionnés</i> .....	40
LES TOPOSÉQUENCES NON INDURÉES SUR MATÉRIAUX KAOLINIQUES. SOLS FERRUGINEUX LESSIVÉS OU APPAUVRIS .....	42
<i>Facteurs de formation</i> .....	42
<i>Caractéristiques des sols</i> .....	43
<i>Conclusions</i> .....	47
LES TOPOSÉQUENCES SUR MATÉRIAUX À PHYLLITES POTASSIQUES: SOLS HYDROMORPHES LESSIVÉS, SOLS À GLEY VERTIQUES .....	48
<i>Facteurs de formation</i> .....	48
<i>Caractéristiques des sols</i> .....	49
<i>Conclusions</i> .....	50

LES TOPOSÉQUENCES À SOLS HALOMORPHES À STRUCTURE DÉGRADÉE SUR MATÉRIAUX À ARGILES GONFLANTES ALCALISÉES .....	51
<i>Facteurs de formation</i> .....	51
<i>Caractéristiques des sols</i> .....	53
<i>Conclusions</i> .....	55
LES TOPOSÉQUENCES À SOLS BRUNS EUTROPHES ET SUBARIDES, À VERTISOLS SUR MATÉRIAUX À ARGILES GONFLANTES CALCQUES .....	57
<i>Facteurs de formation</i> .....	57
<i>Caractéristiques des sols</i> .....	59
<i>Conclusions</i> .....	62
LES SOLS RENDZINIFORMES, LES SOLS ALLUVIAUX CALCIMORPHES, LES VERTISOLS CALCAIRES SUR MATÉRIAUX À ARGILES GONFLANTES CALCAIRES .....	64
<i>Facteurs de formation</i> .....	64
<i>Les sols</i> .....	65
<i>Conclusions</i> .....	66
LES SOLS FERRUGINEUX PEU LESSIVÉS ET LES SOLS SUBARIDES BRUN-ROUGE SUR MATÉRIAUX SABLEUX .....	67
<i>Facteurs de formation</i> .....	67
<i>Les sols</i> .....	74
<i>Conclusions</i> .....	80
LES SOLS PEU DIFFÉRENCIÉS BRUNS SUR MATÉRIAUX SABLEUX .....	83
<i>Facteurs de formation</i> .....	83
<i>Evolution récente et subactuelle des matériaux très sableux</i> .....	84
LES SOLS HYDROMORPHES, LES SOLS ALLUVIAUX, LES VERTISOLS HYDROMORPHES ET LES SOLS SALÉS PAR L'ÉVAPORATION D'UNE NAPPE .....	86
<i>Données générales</i> .....	86
<i>Sols hydromorphes et halomorphes récents</i> .....	88
<i>Conclusions</i> .....	91
CLASSEMENT ET HISTOIRE DES ASSOCIATIONS DE SOLS DU NIGER MÉRIDIONAL .....	93
<i>Classement</i> .....	93
<i>Histoire</i> .....	95
BIBLIOGRAPHIE .....	99

Les Editions de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer tendent à constituer une documentation scientifique de base sur les zones intertropicales et méditerranéennes, les pays qui en font partie et sur les problèmes posés par leur développement.

#### CAHIERS ORSTOM (séries périodiques)

- **biologie**: études consacrées à diverses branches de la biologie végétale et animale; agronomie, biologie et amélioration des plantes utiles, entomologie agricole, nématologie.
- **entomologie médicale et parasitologie**: systématique et biologie des arthropodes d'intérêt médical et vétérinaire, parasitologie, épidémiologie des grandes endémies tropicales, méthodes de lutte contre les vecteurs et les nuisances.
- **géologie**: pétrologie et cycles des éléments (géochimie) - hydrogéologie - altération et érosion - sédimentologie - stratigraphie - orogénèse continentale - métallogénèse - paléogéographie - structure et évolution des fonds océaniques.
- **hydrologie**: études, méthodes d'observation et d'exploitation des données concernant les cours d'eau intertropicaux et leurs régimes.
- **océanographie**: hydrologie, physico-chimie, hydrodynamique, écologie, caractérisation des chaînes alimentaires, niveaux de production, dynamique des stocks, prospection faunistique (Sud-ouest Pacifique, Canal de Mozambique et environs, Atlantique Tropical Est).
- **hydrobiologie**: physico-chimie, écologie, caractérisation des chaînes alimentaires, dynamique des stocks, action des insecticides sur la faune (Bassin Tchadien, Côte d'Ivoire).
- **pédologie**: problèmes soulevés par l'étude des sols: morphologie, caractérisation physico-chimique et minéralogique, classification, relations entre sols et géomorphologie, problèmes liés aux sels, à l'eau, à l'érosion, à la fertilité.
- **sciences humaines**: études géographiques, sociologiques, économiques, démographiques et ethnologiques.

**MÉMOIRES ORSTOM**: consacrés aux études approfondies (synthèses régionales, thèses...) dans les diverses disciplines scientifiques (85 titres parus).

**ANNALES HYDROLOGIQUES**: depuis 1959, deux séries sont consacrées: l'une, aux Etats africains d'expression française et à Madagascar, l'autre aux Territoires et Départements français d'Outre-Mer.

**FAUNE TROPICALE**: collection d'ouvrages principalement de systématique, pouvant couvrir tous les domaines géographiques où l'ORSTOM exerce ses activités (19 titres parus).

**INITIATIONS/DOCUMENTATIONS TECHNIQUES**: mises au point et synthèses au niveau, soit de l'enseignement supérieur, soit d'une vulgarisation scientifiquement sûre (33 titres parus).

**TRAVAUX ET DOCUMENTS DE L'ORSTOM**: cette collection, diverse dans ses aspects et ses possibilités de diffusion, a été conçue pour s'adapter à des textes scientifiques ou techniques très variés quant à leur origine, leur nature, leur portée dans le temps ou l'espace, ou par leur degré de spécialisation (66 titres parus).

Les études en matière de géophysique (gravimétrie, sismologie, magnétisme...) sont publiées, ainsi que certaines données (magnétisme) dans des séries spéciales: **GÉOPHYSIQUE** et **OBSERVATIONS MAGNÉTIQUES**.

**L'HOMME D'OUTRE-MER**: cette collection, exclusivement consacrée aux sciences de l'homme, est réservée à des textes d'auteurs n'appartenant pas à l'ORSTOM, mais dont celui-ci assure la valeur scientifique (co-édition Berger-Levrault) (10 ouvrages parus).

De nombreuses **CARTES THÉMATIQUES**, accompagnées de **NOTICES**, sont éditées chaque année, intéressant des domaines scientifiques ou des régions géographiques très variées.

**BULLETIN ANALYTIQUE D'ENTOMOLOGIE MÉDICALE ET VÉTÉRINAIRE** (périodicité mensuelle; ancienne dénomination jusqu'en 1970: Bulletin signalétique d'entomologie médicale et vétérinaire) (XXIV<sup>e</sup> année).

**OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER**

*Direction générale :*

24, rue Bayard, 75008 PARIS

*Service des publications :*

70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY

---

IMP. M. Bon - Vesoul  
O.R.S.T.O.M. Éditeur  
Dépôt légal : 4<sup>e</sup> trim. 1977  
I.S.B.N. 2-7099-0461-6