

Les processus de formation des sols dans le bassin du Wabi Shebelle (Ethiopie)

Gilles RICHE

Pédologue de l'ORSTOM

RÉSUMÉ

L'éventail des types climatiques, principalement lié à l'altitude, allant du climat tropical semi-aride au climat tempéré, et la présence de matériaux originaux variés (basaltes, calcaires, gypses et marnes), mais susceptibles de fournir des quantités importantes de calcium et de magnésium contribuent à la diversification des processus de pédogénèse dans le bassin du Wabi Shebelle en Ethiopie.

Les transformations et les synthèses des minéraux argileux sont dépendantes du climat et du drainage. Les sommets humides et froids des chaînes montagneuses au-dessus de 3 400 m sont le domaine des allophanes. Plus bas, dans les zones de climat tempéré, se forment de la métahalloysite et sans doute de l'illite en milieu bien drainé, et de la montmorillonite quand le drainage se ralentit. Dans les parties plus sèches ou plus chaudes soumises à des climats de transition xérothérique-tropical ou méditerranéen, la part des minéraux hérités ou de transformation augmente avec prédominance d'illite. Cependant, les synthèses de montmorillonite sont encore importantes en milieu confiné. Au contraire, le climat tropical semi-aride est essentiellement conservateur et les argiles (illite, kaolinite, montmorillonite) sont héritées.

Les humus sont de type mull (mull calcique dominant). Les taux de matière organique sont bien corrélés avec l'indice de Martonne et le rapport P/ETP. L'isohumisme est limité aux sols très pauvres en matière organique. L'augmentation du rôle des graminées dans le cycle de l'humus se traduit par le passage de l'horizon pallide à l'horizon mélanique

pour une teneur en matière organique voisine de 2 %.

La dynamique des carbonates est un des éléments importants de la différenciation des sols. Les processus de dissolution du calcaire primaire puis de désaturation du complexe vont en s'accroissant du climat méditerranéen aux climats plus humides et moins chauds, mais l'importance et le type des accumulations secondaires à partir du calcaire primaire ou d'altérations libérant du calcium dépendent à la fois des conditions climatiques et du drainage interne du sol et de l'âge des accumulations. Les encroûtements massifs durcis et les nodules durcis observés dans le sud du bassin sont interprétés comme les témoins de conditions arides ou semi-arides ayant régné dans cette région au moins depuis le début du Cénozoïque. Par contre, dans les formations du Quaternaire récent (Holocène), les accumulations calcaires sont friables et leur importance liée directement au bilan hydrique de la zone considérée : les plus conséquentes (accumulations massives friables) se rencontrent sous climat de transition tropical-tempéré sec, les plus faibles (nodules friables) sous climat tropical semi-aride.

Par contre, ce dernier type climatique apparaît comme très favorable à la dissolution et à l'accumulation du gypse sous forme diffuse ou en encroûtements dans la zone sud du bassin où les formations gypso-marneuses affleurent largement.

Des efflorescences salines (chlorure de sodium) apparaissent dans les fortes conditions d'aridité de l'extrême-sud du bassin, mais l'alcalisation des sols est rare grâce à l'abondance du sulfate de calcium.

L'individualisation des sesquioxydes de fer conduit à l'apparition de couleurs vives dans de nombreux sols. L'hématite domine. La formation d'oxydes de fer secondaire est favorisée sous climat tempéré et de transition xérotérique tropical, les climats méditerranéens et tropical semi-aride accentuent faiblement l'intensité de la coloration de résidus d'altération déjà rubéfiés.

Des observations faites, il apparaît que les processus pédogénétiques sont surtout influencés par les variations des types climatiques des roches mères du Nord au Sud du bassin étant riches en bases et pouvant être considérées comme un facteur constant dans la pédogénèse.

Il existe donc une zonalité climatique de la pédogénèse liée à l'altitude avec :

- allophanisation sous climat tempéré froid,*
- fersiallisation avec synthèses d'argiles sous climat tempéré de transitions xérotérique-tropical, avec illite de transformation sous climat méditerranéen,*
- différenciation calcaire d'intensité variable en fonction du bilan hydrique du sol donc principalement du climat,*
- différenciation gypseuse dans les zones semi-arides,*
- efflorescences salines dans les régions les plus sèches.*

La vertisolisation s'observe sous tous types climatiques (sauf sous climat tempéré froid) quand le drainage est déficient.

SUMMARY

Various climatic types, mostly in relation with altitude (and ranging from semi arid tropical to cool temperate) and various parent materials (basalts, limestones, gypsum and marls), liable to provide important amounts of calcium and magnesium, contribute to the diversity of the soil formation processes in the Wabi Shebelle watershed in Ethiopia.

Transformations and synthesis of clay minerals depend on climate and drainage. On the top of the humid and cool mountain ridges, above 3,400 m, allophanes can be found. At lower sites, with more temperate climates, metahalloysite and illite can be observed when drainage is good, montmorillonite when drainage slows down. In the warmer and

drier parts of the area with transitional xerotheric-tropical the amount of inherited or transformed minerals where illite prevails increases. However, synthesis of montmorillonite is important in poorly drained sites. On the other hand, where climate is semi-arid tropical, clay minerals (illite, kaolinite, montmorillonite) are mostly inherited.

Humus belongs to the mull type (mostly calcic mull). The amounts of organic matter are well correlated with de Martonne index and P/ETP ratio. Isohumism is limited and can only be observed in soils with a low organic matter content. When the importance of grass organic matter increases, the pallid horizon is replaced by a melanic one, with an organic matter content of about 2 %.

The dynamics of carbonates is important for soil differentiation. The dissolution of limestone, followed by desaturation of the soil complex, increases from the mediterranean climate towards the more humid and cooler climates. The importance and the type of secondary accumulations depend on climatic conditions, on internal drainage of the soil and also on age.

The hard massive lime crusts, and the hard nodules that can be observed in the southern part of the basin, are considered as bearing witness of arid or semi-arid conditions prevailing ever since the beginning of the cenozoic. On the other hand, in the recent quaternary formations (holocene), lime accumulations are soft and their importance is related to hydric balance of the area in consideration. The more important ones (soft but massive accumulations) can be seen under a transition climate between dry tropical and temperate; whereas the softer ones (soft nodules) are present under a semi-arid tropical climate.

On the other hand, this climate seems to favour dissolution and accumulation of diffused or crusty gypsum in the southern part of the watershed, where gypsum and marls largely crop out.

Saline efflorescence (sodium chloride) appears when aridity is at its strongest, in the far south of the basin, but alcalinity is scarce as calcium sulfate is always high.

The formation of iron sesquioxides leads to bright colors in many soils. Hematite is predominating, the formation of secondary oxides is enhanced by temperate and transitional climates; whereas mediterranean and semi-arid tropical climates add little to the color of already rubified weathered residues.

From the observations, soil forming processes seem to be influenced mostly by climatic variations, parent rocks from North to South of the basin being rich in bases and considered as a constant soil forming factor.

So, one can conclude that there exists a climatic zonality in relation with altitude expressed by:

— formation of allophanes under cool temperate climate;

— ferrallitic soil formation with clay mineral synthesis under temperate climate and xerotheric tropical transitional climate; illite appears in this climate;

— calcium carbonate differentiation of variable intensity, according to the water balance of the soil and consequently to the climate;

— calcium sulphate differentiation in semi arid areas;

— saline efflorescence in the more arid parts of the basin;

— vertisol formation appears under all climatic types (except cool temperate climate), whenever drainage is poor.

SOMMAIRE

1. ALTÉRATION DES MATÉRIAUX : TRANSFORMATIONS ET NÉO-SYNTÈSE DE MINÉRAUX ARGILEUX.
2. LA MATIÈRE ORGANIQUE : VARIATION DES TYPES D'HUMUS, RÉPARTITION ET ACCUMULATION ZONALE.
 - 2.1. Les types d'humus : prédominance du mull calcique
 - 2.2. La zonalité climatique de l'accumulation de la matière organique
 - 2.3. L'isohumisme
 - 2.4. Horizons mélanique et pallide : rôle des graminées
 - 2.5. Le processus de brunification
3. LE CALCAIRE : FORME ET DYNAMIQUE
 - 3.1. Les formes de dissolution et d'accumulation du calcaire
 - 3.2. La dynamique du calcaire : influence des conditions climatiques anciennes et actuelles. Age des accumulations
4. LE GYPSE : FORMES ET DYNAMIQUE
 - 4.1. Les formes de dissolution du gypse
 - 4.2. Les formes d'accumulation du gypse
5. LE SODIUM : FORMES ET DYNAMIQUE
6. L'INDIVIDUALISATION DES OXYDES ET HYDROXYDES DE FER
7. CONCLUSION : LA ZONALITÉ CLIMATIQUE DE LA PÉDOGENÈSE
 - 7.1. La variation des processus de pédogenèse en fonction du climat
 - 7.2. Les types climatiques, les types de pédogenèse et les sols

Un précédent article (Riché, 1975) a souligné la diversité climatique qui caractérise le bassin du Wabi Shebelle. Celle-ci, liée principalement à l'altitude, se traduit par un étagement climatique très net de la végétation. On y a défini six types climatiques (1) allant du type tropical semi-aride au Sud au type tempéré froid au Nord : tropical semi-aride (Ogadénien), xérotherique méditerranéen (Fickien), de transition xérotherique tropical (Ethiopien), de transition tempéré xérotherique (Guédébien), tempéré (Tichéen) et tempéré « froid » (Boraluku).

On y a souligné également la grande variété des matériaux originels, tous ayant la possibilité de libérer de grandes quantités de calcium et de magnésium lors de l'altération.

L'éventail considérable des variations des facteurs de formation des sols a engendré une grande diversification des processus pédogénétiques donc des types de sols puisque seules les classes des podzols des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes n'ont pas été observées (1).

Dans le présent article seront envisagées successivement : l'altération des matériaux (transformations et synthèses des minéraux argileux), la matière organique (type d'humus, répartition et accumulation), les formes et la dynamique du calcaire, du gypse et du sodium, la rubéfaction. La combinaison de ces processus liée à leurs intensités respectives permettra d'envisager une zonalité climatique de la pédogenèse.

1. ALTÉRATION DES MATÉRIAUX : TRANSFORMATIONS ET NÉOSYNTÈSE DE MINÉRAUX ARGILEUX

L'intérêt de l'étude de l'évolution, des transformations et des néosynthèses de minéraux argileux est considérable, puisque de fortes variations climatiques ou de drainage affectent une même roche mère sur de faibles distances. Bien que les données soient malheureusement peu nombreuses, on a pu observer quelques séquences d'altération pour un même matériau.

(1) Quant à la caractérisation détaillée du milieu et des sols, on se référera à l'article précité (Riché (G.), 1975) : « Les sols du bassin du Wabi Shebelle et leur utilisation », *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIII, n° 3/4, 1975 : 195-221.

1.1. Séquence sur matériau volcanique : andosols - sols fersiallitiques (sols rouges d'altitude) - vertisols - chernozems (observée en Arusi entre 4 000 et 2 500 m)

A plus de 3 500 m d'altitude, les conditions climatiques (climat Boraluku) favorisent l'accumulation de matières organiques mais aussi de minéraux amorphes. L'hydrolyse des minéraux constitutifs de la roche mère (basalte mais aussi matériau plus acide du type trachyte ou andésite) provoque le départ des bases et d'une grande partie de la silice. Les produits amorphes se forment et donnent naissance à des andosols.

Plus bas, entre 3 500 et 2 500 m, c'est le domaine des sols rouges tropicaux d'altitude. Le drainage est bon et le climat tempéré de type tichéen favorise la synthèse de minéraux 1/1 à dominance de métahalloysite. La présence d'illite en quantité importante (de l'ordre de 14 %) pose un problème qui n'a pas reçu de solution définitive (Riché *et al.*, 1974). En fait, les grands massifs volcaniques renferment d'après nos observations une quantité importante de matériel volcanique de type andésitique ou trachytique susceptible de fournir du potassium pouvant servir à une éventuelle synthèse de l'illite. Cette possibilité qui n'est d'ailleurs pas écartée par les géochimistes, a déjà été évoquée pour expliquer l'origine de l'illite dans certains sols des îles Hawaï (Swindale et Uehara, 1966 ; Juang et Uehara, 1968).

Sur les plateaux basaltiques horizontaux à 2 500 m d'altitude, les mauvaises conditions de drainage, les grandes quantités de magnésium et de calcium libérées par l'altération des basaltes favorisent la formation de smectites. C'est le domaine des vertisols. Le climat tempéré de type tichéen marqué par une petite saison sèche ne paraît pas un obstacle à la néoformation de montmorillonite. Dans des conditions climatiques analogues, Delvigne (1960), Pecrot *et al.* (1962) observent également de la montmorillonite sur basalte dans les zones mal drainées du Kivu méridional.

En position un peu plus basse, 2 400 m, sur tufs andésitiques riches en verre, se développent des chernozems. Les minéraux figurés altérables y sont abondants (plagioclases, hypersthène, hornblende). L'illite y est le minéral argileux dominant, associée à un peu de kaolinite. Ici aussi, se pose le problème de la néoformation de l'illite.

Le climat guédebien avec des précipitations moyennes et une saison sèche assez marquée, provoquerait une altération de la partie vitreuse sodi-

potassique en tuf andésitique avec évacuation médiocre des produits d'altération. Il en résulterait une synthèse d'illite et accessoirement d'un peu de kaolinite (Riché, Ségalen, 1973).

1.2. Les sols rouges fersiallitiques dérivés de granito-gneiss présentent encore de nombreux minéraux altérables dans le B. L'illite, d'origine micacée, domine nettement avec un peu de kaolinite. A la base des profils, les smectites apparaissent en condition de drainage ralenti.

1.3. La séquence sur calcaire : sols rouges fersiallitiques - vertisols sous climat xérothérique « méditerranéen » fickien.

Dans les sols rouges fersiallitiques des zones bien drainées des collines arrondies et des longs glacis colluvionnaires, les illites héritées du calcaire ont tendance à se défaire et permettent la synthèse de métahalloysite (en faible quantité).

Par contre, dès que le drainage se ralentit (plateaux calcaires ou alluvions), le milieu devient confiné et la montmorillonite caractéristique des vertisols apparaît.

1.4. La séquence sur calcaire et gypse sous climat semi-aride ogadénien

Dans les sols à différenciation calcaire et gypseuse, l'illite domine largement dans la fraction argile. Il s'agit ici d'une illite héritée de la roche mère. Des néoformations de montmorillonite dans les petites dépressions caractérisent les sols vertiques, mais vu l'aridité du climat, elles restent faibles.

1.5. Cas particulier des alluvions des Basses Vallées du Wabi Shebelle et du Fafen sous climat semi-aride ogadénien

La montmorillonite est abondante dans les vertisols sur matériau alluvial des Basses Vallées du Wabi Shebelle et du Fafen. En fait, les smectites sont allogènes et proviennent d'un apport dû à l'érosion des vertisols des Hauts Plateaux, la forte aridité de ces vallées n'étant pas favorables à une synthèse importante de minéraux 2/1.

1.6. Conclusion

Dans le bassin du Wabi Shebelle, altérations et néoformations sont liées aux conditions climatiques et au drainage.

LE CLIMAT TEMPÉRÉ EST FAVORABLE

- à la formation d'allophanes pour le type plus froid (climat Boraluku),
- à la synthèse de métahalloysite en condition de bon drainage, et de montmorillonite en milieu confiné (climat type tichéen),
- à la synthèse de l'illite très vraisemblablement (climats types tichéen et guédébien).

LE CLIMAT « MÉDITERRANÉEN » (fickien) EST FAVORABLE

- à l'apparition d'illite de transformation qui peut, elle-même, subir un début de dégradation avec néoformation faible de métahalloysite en milieu bien drainé,
- à la synthèse des smectites en milieu mal drainé.

LE CLIMAT TROPICAL SEMI-ARIDE (ogadénien)

est essentiellement « conservateur » : illites et montmorillonites sont héritées et se maintiennent bien dans le sol. Les néoformations de smectites sont limitées à quelques petites dépressions.

2. LA MATIÈRE ORGANIQUE : VARIATION DES TYPES D'HUMUS, RÉPARTITION ET ACCUMULATION ZONALE

2.1. Les types d'humus : prédominance du mull calcique

La matière organique est de type mull dans tout le bassin, ce qui est principalement dû à l'influence dominante du calcium et des carbonates. L'humus est toujours bien incorporé au sol et sa pénétration en profondeur est forte dans tous les types de sols. Il favorise la formation d'une structure fragmentaire grumeleuse ou granulaire stable dans les horizons mélaniques, polyédrique émoussée à tendance particulière dans les horizons pallides. Le rapport C/N varie entre 10 et 15. Il est plus bas dans les zones les plus sèches et plus élevé dans les régions plus humides et plus fraîches.

La classification des humus de Duchaufour (1970) en fonction du rapport C/N, du pH et d'autres critères tels que la structure des horizons de surface permet de les séparer en trois catégories (cf. tabl. I) : mulls calciques, mulls forestiers et mull acide.

TABLEAU I

Répartition qualitative des types d'humus dans le bassin du Wabi Shebelle

Types d'humus	Climat	Sols
mulls calciques 8,5 < C/N < 15 pH 6,6-8,5	éthiopien-guédébien fickien, ogadénien tichéen	sols xériques — d'érosion — calcimagnésiques — à dif. calcaire — à dif. gypseuse — fersiallitiques (type rouge méditerranéen) sols vertisols
mulls forestiers 11 < C/N < 14 pH 5,9-6,9	tichéen	sols brunifiés — fersiallitiques d'altitude
mull acide C/N 13 pH 5,4	Boraluku	Andosols

Le domaine du mull calcique est de loin le mieux représenté car il s'étend du climat tropical semi-aride (ogadénien) au climat tempéré à tendance sèche (guédébien). Il caractérise de nombreux types de sols. Le mull forestier n'apparaît qu'en haute altitude sous climat tempéré de type tichéen. Le mull acide n'est observé qu'à plus de 3 500 m sous climat tempéré « froid » de type Boraluku.

Les variations climatiques influent donc sur la « qualité » de l'humus. Il s'acidifie en passant des zones sèches et chaudes du Sud aux zones plus froides et humides du Nord. Toutefois, cette tendance à l'acidification est fortement freinée même sous climat tichéen quand les conditions de drainage sont défavorables ; les solutions du sol se chargent alors en calcium et magnésium, et favorisent l'apparition de mulls calciques dans les vertisols des Hauts Plateaux.

2.2. La zonalité climatique de l'accumulation de la matière organique

L'éventail très large des pluviométries (de 200 à 2 000 m) et des températures (de 12 °C à 28 °C) se traduit par la grande diversification des types d'associations végétales (Riché, 1975), donc par des variations importantes des quantités de matériaux susceptibles d'être transformées en matière orga-

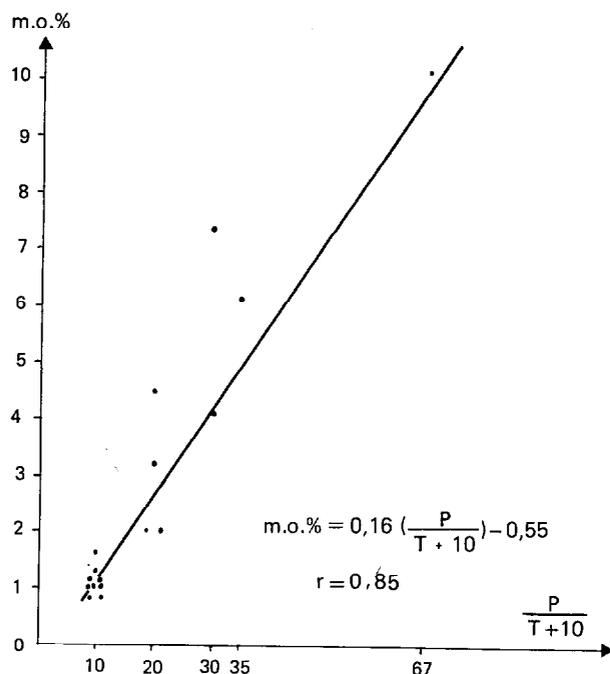


FIG. 1. — Corrélation matière organique indice de Martonne des horizons A₁.

rique. La figure 1 montre une accumulation croissante de la matière organique dans les horizons A₁ des sols en allant des climats secs et chauds vers les climats humides et froids. Aussi la teneur en matière organique passe de 1 % sous climat ogadénien à 24 % sous climat Boraluku. (La valeur 1 % est une médiane pour les sols « arides », la valeur 24 % une valeur extrême dans les andosols.)

Les variations des taux de matière organique peuvent être quantifiées en fonction de certains éléments du climat.

C'est ainsi que la corrélation entre la teneur en matière organique et l'indice de Martonne est linéaire et forte. On obtient la droite de régression suivante (fig. 1) :

$$\text{m.o. \% (hor. A}_1) = 0,16 \left(\frac{P}{T+10} \right) - 0,55 \quad \text{avec } r = 0,85$$

où P est la pluviosité annuelle

T est la température moyenne annuelle.

La corrélation avec le rapport $\frac{P}{\text{ETP (Thorntwhaite)}}$

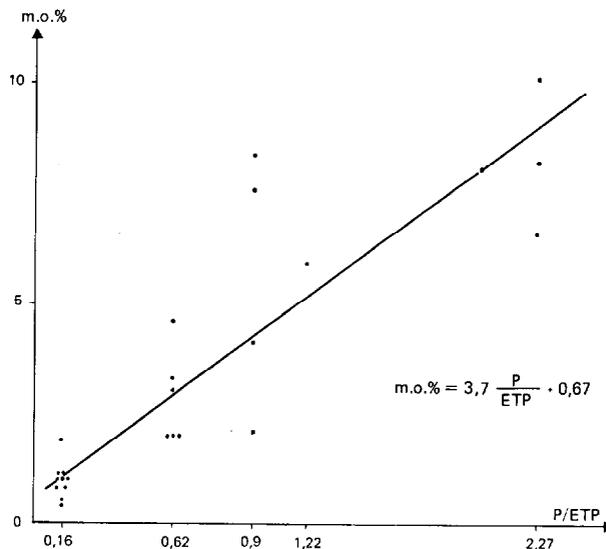


FIG. 2. — Corrélation matière organique - $\frac{P}{\text{ETP}}$ (Thorntwhaite) horizon A₁

qui donne une bonne idée de l'état hydrique des horizons supérieurs au cours de l'année, donc de l'activité biologique qui y règne, est également linéaire et son indice r un peu plus fort. La droite de régression est la suivante (fig. 2) :

$$\text{m.o. \% (hor. A}_1) = 3,7 \frac{P}{\text{ETP (Thorntwhaite)}} + 0,67 \quad \text{avec } r = 0,87$$

L'accumulation de la matière organique apparaît donc comme un processus « zonal », mot ici pris dans un sens particulier puisque c'est surtout l'altitude et non la latitude qui provoque une modification des conditions climatiques. Cependant, dans les vertisols des zones dépressionnaires, les taux de matière organique sont nettement plus élevés que dans les sols environnants (jusqu'à 3 %) ; l'accumulation est due au pédoclimat plus humide (inondations, action d'une nappe phréatique) qui favorise le développement d'une végétation beaucoup plus dense que la végétation climatique.

2.3. L'isohumisme : processus limité aux sols pauvres en matière organique des zones sèches et chaudes

La figure 3 montre que seuls les sols à différenciation calcaire ou gypseuse des zones semi-arides de

l'Ogaden présentent une distribution isohumique de la matière organique très nette. Ceci confirme bien les observations faites dans d'autres zones sèches d'Afrique (Afrique de l'Ouest, notamment). Souvent, cependant, le taux de matière organique est inférieur à 1 % et l'on est en droit de s'interroger sur la valeur de la répartition isohumique pour des teneurs aussi faibles.

Dans les autres zones climatiques, la répartition de la matière organique n'est pas isohumique mais la décroissance avec la profondeur est régulière sous climat fickien, éthiopien et guédébien, domaines des mulls calciques bien incorporés au sol sur une forte épaisseur. L'accumulation relative et absolue en surface s'accroît sous climat tichéen et Boraluku où prédominent les mulls forestiers et acides.

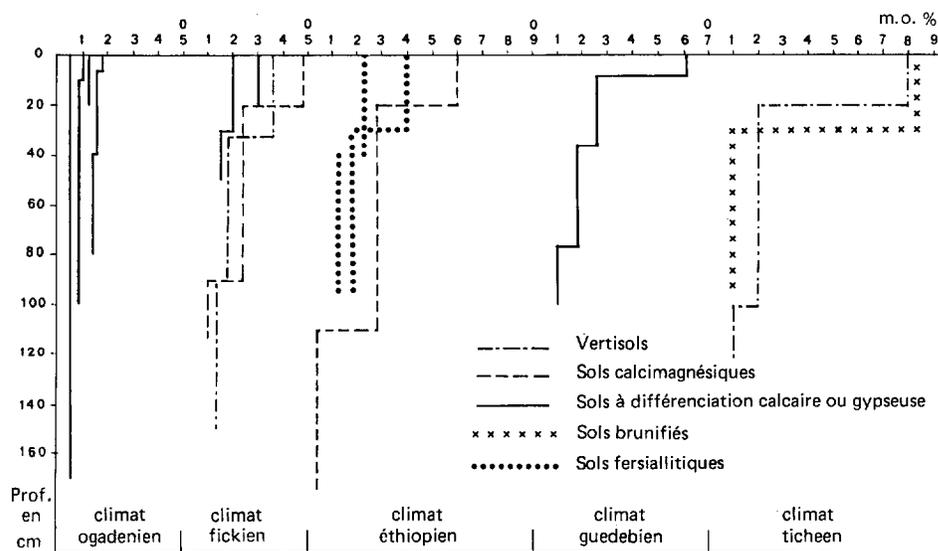


FIG. 3. — Variation de la matière organique avec la profondeur en fonction des types de sols et des types climatiques.

2.4. Horizons mélanique et pallide : rôle des Graminées

L'horizon mélanique (à rapprocher de l'épipédon mollique de l'USDA) est foncé, forme d'un mull calcique ou forestier et caractérise, outre certains sols à différenciation calcaire, la plupart des sols se développant sous climat fickien, éthiopien, guédébien et tichéen (vertisols, sols fersiallitiques, sols calcimagnésiques...).

L'horizon pallide (épipedon ochrique de l'USDA) est plus clair, plus pauvre en matière organique et caractérise les sols à différenciation calcaire ou gypseuse des zones sèches de l'Ogaden.

La transition de l'horizon pallide vers l'horizon mélanique est rapide. Elle se traduit par un changement de couleur autour de 2 % de matière orga-

nique correspondant au passage du climat ogadénien vers le climat fickien. Les graminées jouent un rôle essentielle dans la modification de la couleur des horizons de surface qui se produit pour des teneurs en matière organique relativement faibles.

Sous climat ogadénien, la matière organique provient surtout des arbustes, la strate graminéenne éphémère pendant la courte saison des pluies ; les transformations sont lentes et la synthèse d'acides humiques gris reste faible. de fait l'horizon supérieur reste clair (horizon pallide).

Sous climat fickien plus humide, la strate graminéenne est plus puissante et plus durable que dans le cas précédent, l'activité biologique, plus forte, s'étale davantage dans le temps ; la formation de complexes argilo-humo-ferrugineux de couleur foncée stables se trouve favorisée (horizon mélanique).

Ainsi, le changement de couleur de l'horizon A_1 qui s'observe en passant du climat tropical semi-aride au climat méditerranéen n'est pas tant lié à une augmentation importante du taux de matière organique qu'à un changement dans l'origine de l'humus dans la zone de transition climatique : ainsi sous climat ogadénien, il provient principalement de la décomposition des feuilles des arbustes alors que sous climat fickien il se forme surtout à partir des graminées.

2.5. Le processus de brunification

Il caractérise les sols bruns ; il se produit sous climat tichéen et se rapproche du processus de brunification observé en pays tempéré. L'altération du basalte fournit du calcium et du fer, le climat humide et frais favorise l'évolution de l'humus vers un mull forestier. Dans ce cas, c'est le calcium qui présente une action flocculante (sols bruns eutrophes). Par contre, sur cendres modérément acides (sols bruns mésotrophes), les ions $Al(OH)_2$ et $Al(OH)^{++}$ maintiendraient la stabilité des agrégats (Schwertmann, 1969, cité par Duchaufour).

3. LE CALCAIRE : FORMES ET DYNAMIQUE

Les calcaires (calcaires durs cristallins) et les roches susceptibles de donner naissance à des carbonates (basaltes surtout) ont une grande extension dans la zone étudiée. Deux processus caractérisant la pédogénèse liée au calcaire furent observés :

— la dissolution des roches mères calcaires et l'exportation hors du profil, et même du paysage, des carbonates par les eaux de drainage ; le calcaire figuré du sol est donc un calcaire primaire : cas des sols calcimagnésiques ;

— la dissolution des roches mères calcaires ou l'altération des roches riches en calcium (et magnésium) suivie d'une redistribution des carbonates (accumulation secondaire) dans un horizon du sol : c'est le cas des sols à différenciation calcaire et aussi des vertisols.

3.1. Les formes de dissolution et d'accumulation du calcaire

3.1.1. LES FORMES DE DISSOLUTION DU CALCAIRE SANS ACCUMULATION SECONDAIRE

Le substratum des sols calcimagnésiques est un calcaire dur qui ne peut s'imbiber d'eau. Il s'altère

par « corrosion superficielle » ou dissolution en surface (Duchaufour, 1970, Lamouroux, 1972). Les fragments de calcaire présentent des arêtes émoussées avec des surfaces très ondulées qui témoignent de la « fonte » du calcaire en place.

3.1.2. LES FORMES D'ACCUMULATION SECONDAIRE DU CALCAIRE

Quatre formes d'accumulation ont été observées et ont permis de définir et de distinguer quatre groupes de sols à l'intérieur de la classe des sols à différenciation calcaire ;

L'accumulation diffuse (sols à calcaires poudreux)

Le profil présente des particules calcaires fines de la taille des limons et de l'argile. Elle caractérise quelques sols sur alluvions récentes dans les zones les plus sèches. Une bonne partie de ces éléments fins calcaires provient d'un apport ayant subi une dissolution faible d'une réprécipitation fine sur place.

Les amas et les nodules

Il convient de séparer amas et nodules concrétionnés durcis et amas et nodules friables.

Amas et nodules concrétionnés durcis se rencontrent sur les grands plateaux calcaires de l'Ogaden. Les nodules ont une forme ronde et régulière dont la taille varie de 0,5 à 2 cm. Leur section montre une structure concentrique en anneaux gris-blanc et rouge-saumon. Les amas constitués de nodules soudés entre eux ont une forme irrégulière avec une taille variant entre 10 et 20 cm. Amas et nodules présentent la même texture très fine et la même dureté que le calcaire en place sous-jacent. Amas et nodules friables caractérisent des matériaux alluviaux colluviaux ou d'épandage. Les nodules isolés dominant, et les amas nodulaires y sont rares. Contrairement aux nodules concrétionnés durcis, leur forme est irrégulière et leur texture hétérogène. On les observe sur colluvions et alluvions basaltiques dans les horizons BCa des vertisols (taille 1-3 cm) et sur colluvions et épandages de grès où ils incluent des sables quartzeux (taille 1-2 cm).

Les encroûtements massifs durcis ou encroûtements nodulaires

Sur calcaire les nodules concrétionnés durcis décrits précédemment sont enrobés et cimentés entre eux par un ciment gris-blanc très dur de texture très fine et homogène. Le sommet des encroûtements

présente souvent des pellicules rubannées fines de couleur saumon. En dessous, on note fréquemment la présence d'un horizon d'altération, blanc et friable, du calcaire en place ;

Sur grès les nodules, irréguliers et friables sont riches en éléments quartzeux cimentés par du calcaire.

Les accumulations massives friables

Elles caractérisent les chernozems situés à 2 400 m d'altitude. De couleur gris-blanc à blanc-jaune, elles proviennent de l'altération des basaltes situés en position haute dans le paysage (2 500-3 000 mètres) qui donne à ce niveau des vertisols (Riché, 1975). Cet encroûtement a une densité apparente très faible et inclut de nombreux éléments de verre provenant du tuf andésitique en place. Des amas calcaires (poupées calcaires) plus denses s'y rencontrent fréquemment. L'ensemble est friable, et se désagrège à la moindre pression. C'est le « soft powdery lime » des auteurs anglo-saxons.

3.2. La dynamique du calcaire : influence des conditions climatiques anciennes et actuelles. Age des accumulations.

3.2.1. DISSOLUTION DU CALCAIRE SOUS ACCUMULATION SECONDAIRE

Ce type de dissolution du calcaire s'observe sous le climat fickien et éthiopien, en position de très bon drainage (buttes témoins calcaires, calcaires fissurés). Cette dissolution est nette dans les rendzines et les sols bruns calciques ou calcaires. Elle apparaît totale dans les sols fersiallitiques (compléments décarbonatés), ces derniers étant sûrement des sols plus âgés. Les climats éthiopien et fickéen sont donc favorables au départ des carbonates en position bien drainée. Toutefois, la décarbonation, complète sous climat éthiopien plus humide — 1 000 mm — (sols calciques en A), est partielle sous climat fickien plus sec — 600 mm — (sols calcaires en A).

3.2.2. DISSOLUTION AVEC ACCUMULATION SECONDAIRE DU CALCAIRE

A l'exception de la zone des chernozems, les accumulations calcaires sur matériau calcaire ou gréseux sous climats secs et chauds sont les plus fortes dans les parties hautes du paysage (collines,

plateaux) et les plus faibles dans les parties basses (glacis, alluvions).

Dans les climats les plus secs, climats ogadénien et fickien, l'accumulation du calcaire se fait principalement selon le processus de dissolution et re-précipitation dans le sens vertical signalé par Boulaïne (1967) en Algérie. Les accumulations liées au lessivage oblique qui apparaissent déjà sous climat fickien (600 mm de pluviosité) s'accroissent sous climat plus humide et plus frais (climat éthiopien et guédébien avec respectivement 1 000 mm et 800 mm de précipitations annuelles moyennes.

3.2.2.1. Nodules et encroûtements anciens

Sous climat ogadénien (300 mm de pluviosité moyenne annuelle) les nodules sont abondants sur les grands plateaux calcaires de l'Ogaden. L'accumulation calcaire s'y produit en raison du drainage défectueux au niveau des dalles de calcaire dur horizontales. Cette appréciation doit être cependant tempérée par quelques considérations sur la climatologie de la région (Riché, 1975) : les saisons des pluies y sont courtes et la répartition des précipitations particulièrement irrégulière ; le bilan hydrique calculé (méthode de Thornthwaite et Matter, 1957) montre que c'est seulement pendant 4 jours au cours de la première saison des pluies et 8 jours durant la seconde qu'il s'y produit un léger drainage ou à défaut, une saturation du sol par l'eau. Les phénomènes liés à la dynamique du calcaire ne peuvent donc se développer qu'avec une extrême lenteur.

Selon Ruellan, la configuration des nodules, de structure concentrique, de texture fine, de grande dureté et de couleur rouge-saumon témoigne en faveur d'une formation très lente. Les plateaux calcaires qui n'ont pas subi de mouvements tectoniques depuis le Secondaire sont restés horizontaux et à l'abri des processus d'érosion géographique (absence de réseau hydrographique organisé) ont constitué un milieu favorable à l'individualisation de ce type de nodules par dissolution et re-précipitation sur place du calcaire favorisées par la présence d'une dalle calcaire non perméable à faible profondeur. Très probablement ces nodules qui paraissent se « nourrir » encore actuellement sont donc très anciens et se sont formés dans des conditions climatiques peu différentes de celles d'aujourd'hui.

Par contre, sous le même climat, les sols sur alluvions et colluvions quaternaires pourtant calcaires mais bien drainantes, ne présentent pas de nodules, ce qui pourrait être un reflet de leur jeunesse relative

mais aussi pas d'encroûtement, qui lui, pourrait être actuel.

Sous climat fickien (pluviosité moyenne annuelle 600 mm), les encroûtements nodulaires durcis apparaissent sur les collines ou les plateaux calcaires et gréseux.

— Sur les plateaux calcaires la croûte calcaire est formée des minces nodules décrits plus haut, noyés dans un ciment calcaire également très dur et présentant des pellicules rubannées rouge-saumon à sa partie supérieure. La transition est brutale avec le sol et parfois avec l'horizon C d'altération sous-jacent. L'augmentation des précipitations par rapport au climat ogadénien provoque une intensification du processus vertical de dissolution et précipitation. Le bilan hydrique selon Thornthwaite indique qu'il y a drainage durant 25 jours au cours de l'unique saison des pluies (tabl. II) alors que sous climat ogadénien il est de 12 jours et réparti en deux saisons des pluies, les quantités de carbonates dissous et reprécipités sont plus importantes et donnent lieu à la formation d'une croûte continue. Il y a une migration progressive du calcaire de la base vers le sommet de l'encroûtement avec augmentation de la teneur en carbonates du bas vers le haut. De nombreux auteurs s'accordent à penser que ces croûtes très dures sont très anciennes et même fossiles. Comme pour le climat ogadénien, aucun indice ne permet de noter des variations climatiques importantes depuis une très longue période et l'on peut supposer que ces croûtes se sont formées sous un type de climat peu différent du climat actuel.

— Sur les plateaux gréseux, l'encroûtement est beaucoup plus pauvre en nodules et très riche en quartz cimenté par du calcaire. L'encroûtement présente de nombreux vides (vacuoles). Là aussi la prise en masse des éléments quartzeux par du calcaire paraît avoir été très lente.

Prédominance d'un climat semi-aride depuis l'Eocène dans le Sud du bassin du Wabi Shebelle.

Les quelques renseignements en notre possession sur la paléoclimatologie de ces régions semblent confirmer l'importance de ce facteur sur les caractéristiques actuelles des sols. Si les données sur les antécédents climatiques du bassin du Wabi Shebelle sont, à notre connaissance, inexistantes, par contre, celles des régions environnantes sont mieux connues. F. Gasse *et al.* (1974), Taïeb (1972) indiquent une phase humide à l'Holocène dans le désert Danakil et la vallée de l'Awash, en partie en relation avec les variations climatiques sur les plateaux centraux

de l'Ethiopie. Selon Butzer et Hansen (1968), il y aurait eu dans le désert nubien, six pluviaux de caractère varié depuis le Pleistocène ancien, mais dont les conséquences géomorphologiques ont été faibles. Toujours selon les mêmes auteurs, le Pleistocène aurait connu en Afrique de l'Est plusieurs phases pluviales mais de faible durée. J.C. Fontes, C. Mousse *et al.* (1972) signalent des périodes humides au Pleistocène supérieur et à l'Holocène dans le Sud de l'Afar mais là aussi de faible importance. Donc, déjà, dans plusieurs secteurs d'Afrique de l'Est, les interpluviaux auraient dominé le Pleistocène ancien ce qui traduit une tendance nette à l'aridité depuis cette époque. Il est fort probable, comme l'indiquent Bauduin et Dubreuil (1973), que la formation des chaînes volcaniques du Nord et de l'Est du bassin a contribué à l'aridification depuis l'Eocène dans la région de l'Ogaden. Mais c'est en Arabie Saoudite, sur le plateau de Shegdum formé de calcaire dolomitique du Miocène ou Pliocène, donc plus récent que les calcaires de l'Ogaden, que Shapmann (1971) décrit une « duricrust » fort semblable aux encroûtements durcis nodulaires observés dans le sud du bassin. L'auteur indique que la formation de cette croûte a été très lente puisqu'il la fait débiter au Pleistocène ancien, soit il y a 10⁶ années. A l'Holocène, il note la présence d'une phase de dissolution, phase inexistante en Ogaden puisqu'aucune formation du type karstique n'y est observée. Ceci montre que depuis l'Eocène qui correspond à la fin de la période de dépôt des grès de Gésoma, démantelés progressivement par la suite, aucune période climatique très humide ne paraît avoir existé. Tout se passe comme si l'Ogaden n'avait pas connu de pluviaux importants depuis le début du Tertiaire. L'aridité a donc été un des traits constants du climat de cette région dès cette époque. Aussi, croûtes et nodules pourraient être très anciens, d'âge Eocène et peut-être Crétacé pour les zones où les calcaires n'ont pas été recouverts par les grès. Un climat semi-aride à partir du commencement du Mésozoïque aurait donc régné avec des phases pluvieuses plus ou moins concentrées, un peu plus humide vers le Nord (climat fickien) avec formation de croûtes, plus sec vers le Sud (climat ogadénien) avec formation de nodules.

3.2.2.2. Nodules et encroûtements récents

Les nodules et encroûtements friables de texture hétérogène et sans structure bien définie sont, selon de nombreux auteurs, dus à des accumulations rapides du calcaire. Etant donné les positions topo-

graphiques dans lesquelles ils se rencontrent dans le bassin du Wabi Shebelle (zone de battement de nappe ou de variation saisonnière d'humidité du sol), ils sont donc récents et au plus, contemporains de l'âge des dépôts à partir desquels ils se sont formés (Quaternaire).

Sous climat ogadénien, des nodules friables, peu nombreux il est vrai, apparaissent dans les grandes zones d'épandage de désagrégation des grès reposant sur des dalles calcaires. Leur formation paraît due à une variation notable d'humidité au-dessus de la dalle calcaire, la perméabilité de l'arène gréseuse étant forte et les remontées capillaires faibles. La zone affectée se charge peu à peu en carbonates secondaires qui vont donner des nodules constitués de grains de quartz cimentés par du calcaire et présentant une forme très irrégulière. L'apparition des nodules dans les formations récentes de l'Ogaden est due surtout au processus de dissolution-précipitation verticale déjà observé sur les plateaux calcaires mais qui se développe ici dans un milieu très perméable. Sur colluvions ou alluvions calcaires argileuses, on n'observe jamais de nodules.

Sous climat fickien : la mobilisation du calcaire est plus forte que sous climat ogadénien, comme nous l'avons vu précédemment. La présence d'un horizon C altéré de dimensions notables sous les sols à encroûtement et la dissolution du calcaire présent dans le profil des sols calcimagnésiques indiquent qu'il existe des possibilités de lessivage oblique. Il apparaît des nodules friables dans les colluvions et alluvions, mais aussi dans les zones déprimées des plateaux dès que les caractères vertiques se manifestent. Sur les vastes épandages provenant des grès à l'Ouest de Ginir et dans le Nord-Ouest du bassin, on observe des nodules friables qui ont la même origine que ceux observés dans les mêmes matériaux en Ogaden. Cependant, ces nodules friables apparaissent plus nombreux sous climat fickien.

Sous climat tichéen tempéré (température moyenne annuelle 12,8 °C) et beaucoup plus humide (pluviosité annuelle 1 300 mm), les carbonates sont normalement éliminés mais des concentrations calcaires vont apparaître dans les vertisols sous forme de nodules à la suite du confinement lié au mauvais drainage sur les épanchements basaltiques horizontaux. Le bilan hydrique selon Thornthwaite est nettement excédentaire (240 jours par an de drainage). Les carbonates ont tendance à être évacués, pour autant que la topographie le permet.

Sous climat guédébien (800 mm de pluies par an), l'accumulation massive friable dans les chernozems présente deux différences fondamentales avec les encroûtements nodulaires décrits précédemment :

— elle est liée en grande partie à un lessivage oblique des carbonates provenant de l'altération des basaltes situés en partie haute sous climat tichéen qui viennent s'accumuler plus bas sous climat guédébien le reste étant fourni par l'altération des tufs andésitiques ;

— cette accumulation est récente puisqu'elle s'est formée sur des tufs andésitiques de la fin Tertiaire-début Quaternaire et se poursuit actuellement. La présence d'évaporites calcaires actuelles dans de petites dépressions en témoigne.

La formation de cet encroûtement massif friable s'explique par :

— la présence d'une source de calcium, importante, provenant surtout de l'altération intense des basaltes sous climat tichéen humide,

— la position en « cuvette » de la zone des chernozems permettant une concentration du calcium par lessivage oblique,

— le climat guédébien plus sec : le bilan hydrique de Thornthwaite indique un déficit hydrique de 150 jours consécutifs par an, montre que la possibilité d'accumulation des carbonates en est facilitée,

— enfin, les tufs andésitiques riches en verre constituent un milieu aéré et, de ce fait, favorisent le dépôt de carbonates.

3.2.3. CONCLUSIONS

Les accumulations calcaires friables sont récentes et caractérisent les formations quaternaires : alluvions, colluvions, dépôts volcaniques cendreux. Elles sont dues principalement à des migrations latérales suivies d'accumulation. En supposant, ce qui est probable, que le climat ait peu changé depuis le début du Quaternaire, l'action de celui-ci vis-à-vis de la dynamique du calcaire, va se refléter dans l'intensité et les formes de l'accumulation (fig. 3). Alors que le climat ogadénien ne provoque aucun déplacement latéral du calcaire, par contre le climat guédébien favorise les concentrations importantes de carbonates. Le climat fickien est intermédiaire. Les climats tichéen et éthiopien sont favorables, soit à la dissolution, soit à la concentration selon l'intensité du drainage. Le bilan hydrique calculé du sol (Thornthwaite) montre que l'intensité du lessivage ou de

l'accumulation peut être mise en relation avec l'importance relative des périodes déficitaires et excédentaires en eau du sol dans un milieu riche en carbonates.

Les accumulations calcaires durcies sont très anciennes sur les plateaux calcaires ou gréseux où l'érosion a été peu sensible (Middle Belt, Ogaden)

La formation des nodules et des encroûtements y a été très lente, et liée à des mouvements verticaux des solutions. Elle a commencé à l'ère Tertiaire et a été le fait de climats secs et chauds sans doute peu différents de ceux qui prévalent aujourd'hui, plus secs au Sud (nodules), plus humides au Nord (encroûtements nodulaires).

TABLEAU II

La dynamique des carbonates

Climat (1)	Type d'évolution du calcaire sur matériau quaternaire	Type d'évolution du calcaire sur matériau Jurassique-Crétacé	Bilan hydrique actuel selon Thornthwaite et Matter (2)			
			Déficit (mm)	Excédent (mm)	Déficit (jours/an)	Excédent (jours/an)
Ogadénien	—	nodules durcis	1 455	50	305	12
Fickien	nodules friables (m.d.)	encroûtement massif durci	411	110	143	25
Ethiopien	nodules friables (m.d.)	dissolutio (b.d.)	169	106	150	150
Guédébien	encroûtement massif friable	—	67	205	150	90
Tichéen	nodules friables		0	689	0	240
Boraluku p.m.	entraînement Ca Mg (b.d.)					
	entraînement Ca Mg (m.d.)					

(1) Pour les caractéristiques des climats se référer au tableau.

(2) Calculé sur le nombre de jours de pluies et l'ETP journalière.

m.d. = mauvais drainage.

b.d. = bon drainage.

p.m. = pour mémoire.

4. LE GYPSE : FORMES ET DYNAMIQUE

Les formations gypseuses du Sud du bassin sont constituées de gypse en dalles de dureté variable, rarement friable, le plus souvent de texture fine et compacte, alternant avec des bancs de marnes souvent salés, très tendres. Les dalles de gypse forment l'armature du paysage, les couches marneuses sus-jacentes ayant été décapées par l'érosion. L'effondrement tectonique de la fin Tertiaire qui a donné naissance à la vallée du Wabi Shebelle (Riché, 1975) a provoqué une reprise d'érosion généralisée dans toute la région entraînant la disparition des pédogènes anciennes, ce qui ne s'est pas produit pour les plateaux calcaires horizontaux formés d'un

matériau beaucoup plus dur. Donc, sur les gypses est né un nouveau paysage à partir du Quaternaire : formation de petites collines arrondies séparées par des vallées en V en amont, entraînement des matériaux provenant de l'altération du gypse, des marnes, aussi des calcaires par recul des versants, corniches calcaires, des grès... débouchant sur la formation des zones alluviales et de cônes de déjections sur les bords des vallées du Fafen et du Wabi Shebelle.

En effet, le climat ogadénien qui sévit dans cette région est doué d'une agressivité certaine vis-à-vis du gypse. Si son action sur les migrations obliques du calcaire est pratiquement nulle, par contre son influence sur la dynamique du gypse, beaucoup plus soluble (et dont la solubilité est encore augmentée par la présence de chlorure de sodium) est très nette.

Ces paysages gypseux sont ainsi caractérisés par deux processus très facilement observables : dissolution du gypse dans les parties hautes et accumulation de celui-ci dans les zones les plus basses avec formation de sols à différenciation gypseuse. Cependant, à l'extrême Sud du bassin où des conditions hyperarides apparaissent avec moins de 150 mm de pluie par an, le gypse se dissout peu et ne migre pratiquement pas. Il se forme alors des sols peu évolués gris xériques.

4.1. Les formes de dissolution du gypse

Les formations gypseuses à l'inverse des plateaux calcaires sont découpées par un réseau hydrographique serré délimitant des collines convexes où les dalles de gypse affleurent et sont soumises à l'érosion. Les eaux de pluies vont surtout provoquer une ablation chimique par dissolution et transport en solution des sulfates (et des chlorures) des zones hautes vers les zones basses. Ce processus se traduit par l'apparition de « guillochage » sur les dalles gypseuses ou le plus souvent par l'apparition sur la dalle d'un stade intermédiaire poudreux qui correspond à la désagrégation fine de la roche sous l'action des facteurs biophysiques. La dissolution est de toute façon très lente puisque le calcul du bilan hydrique montre qu'il ne ruisselle sur les dalles de gypse que 145 mm d'eau en quatre mois non consécutifs dans la région de Godé.

Aux confins désertiques de la Somalie, sur les grandes zones plaines gypseuses du Sud-Est, la dissolution du gypse est faible. L'évolution de la dalle de gypse s'arrête au stade poudreux.

4.2. Les formes d'accumulation du gypse

4.2.1. ACCUMULATION SOUS FORME DE CRISTAUX DE GYPSE (gypse poudreux)

Le gypse s'individualise sous forme de cristaux dans les alluvions du Wabi Shebelle et du Fafen. L'accumulation n'est pas directement liée aux processus de dissolution décrits plus haut mais plutôt à l'action d'une nappe phréatique alluviale chargée en gypse qui remonte plus ou moins haut dans les alluvions pendant les périodes pluvieuses en Ogaden avec une influence certaine, notamment pour le Wabi Shebelle, du niveau des crues. Les cristaux de gypse apparaissent toujours plus nombreux quand la texture s'alourdit (niveau argileux ou limoneux des sols

alluviaux stratifiés) et horizon B structural des vertisols. La faiblesse de l'accumulation gypseuse est due :

- au fait que les alluvions elles-mêmes ne sont pas gypseuses,
- au fait que la nappe phréatique elle-même chargée en sulfate de calcium n'affecte que très épisodiquement les horizons de profondeur des sols.

4.2.2. LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX

Les encroûtements gypseux des sols rouge-jaune encroûtés (Riché, 1975) des colluvions et alluvions des formations gypseuses sont l'aboutissement logique des processus de dissolution qui caractérisent les parties hautes du paysage. L'accumulation du gypse, qui peut atteindre de grandes épaisseurs, notamment sur alluvions (jusqu'à 6 m dans certains cas), se produit toujours dans des zones basses de colluvions ou d'alluvions. Comme tout le réseau d'oued se termine par des cônes de déjections (Riché, 1975) sans écoulement extérieur, le cycle dissolution-accumulation fonctionne en circuit fermé. Les sulfates vont donc s'accumuler en grande quantité dans la partie du sol qui présente une discontinuité dans la porosité (généralement due à la présence d'une dalle de gypse sous le manteau alluvial ou colluvial). La présence de chlorure de sodium va encore augmenter la charge des eaux en sulfates et les possibilités d'accumulation.

5. LE SODIUM : FORMES ET DYNAMIQUE

Malgré l'abondance du chlorure de sodium particulièrement dans les zones gypseuses, on n'observe jamais d'alcalinisation du complexe absorbant du sol. Les grandes quantités de calcium fournies par les roches-mères empêchent toute fixation importante du sodium sur le complexe. Cet élément aura donc peu d'importance sur la structure des sols. Par contre, les solutions qui circulent dans les zones alluviales et colluviales de l'Ogaden sont souvent très chargées en sels (surtout chlorure de sodium). Aux confins Sud-Est du bassin, des efflorescences salines apparaissent à la surface du sol ; le climat ogadénien dans son sous-type le plus aride (100-150 mm de pluies), mais seulement dans ce cas, apparaît favorable aux concentrations importantes des sels solubles dans et à la surface des sols (avec dominance du chlorure de sodium).

TABLEAU III

Climats et Pédogenèse dans le bassin du Wabi Shebelle

		Tempéré froid Boraluku	Tempéré Ticheen	Tr. xerothermique-tempéré Guedebien	Tr. xerothermique-tropical Ethiopien	Méditerranéen Fickien	Tropical semi-aride Ogadénien
MINÉRAUX Néofonnations héritages				héritage croissant			
	bon drainage	allophanes ++++	illite(?)-métahalloysite +++ ++	synthèses illite(?)-kaolinite ++++ +	illite illite(?)-métahalloysite +++ +	illite	illite-montmorillonite
	milieu confiné		montmorillonite ++++	montmorillonite +	montmorillonite +	montmorillonite +++	montmorillonite +
Matière organique		20 % mull acide	10 % mull forestier brunification	5 % mull calcique	4,2 % mull calcique	2,6 % mull calcique	1 % mull calcique
dynamique quaternaire des carbonates du Ca et Mg du complexe abs.	bon drainage mauvais drainage	← Lessivage Ca Mg désaturat. forte du complexe	Lessivage Ca Mg désaturat. faible du complexe nodules friables +	dissolution carbonates (hor. sup.)	dissolution carbonates faible	dissolution carbonates faible	
		← accumulation croissante des carbonates				encroûtement massif friable	—
dynamique ancienne des carbonates						← accumulation croissante des carbonates	
dynamique du gypse						encroûtement massif durci	nodules durcis
dynamique du chlorure de sodium							dissolution accumulation : - gypse diffus - encroûtement
							accumulation du chlorure de sodium (zones les plus arides)
Processus de pédogenèse		allophanisation	← rubéfaction	différenciation calcaire	← rubéfaction		
			fersiallisation → ferrallitisation		dissolution des carbonates forte fersiallisation ss	dissolution des carbonates faible diff. calcaire fersiallisation ss	différenciation calcaire différenciation gypseuse halomorphie
Types de sols		Andosols	sols fersiallitiques faiblement désaturés	sols à différenciation calcaire à encr. massif friable chernozems	sols calcimagnésiques calcaïques sols fersiallitiques saturés	sols calcimagnésiques calcaïques sols à diff. calcaire - à amas et nodules - à encr. massif durci sols fersiallitiques saturés : sols rouges méditerranéens	sols à différenciation cal- caire à amas et nodules sols à différenciation gypseuse - à gypse poudreux - encroûtés sols halomorphes salins
			← calcaïques		vertisols		carbonatés

6. L'INDIVIDUALISATION DES OXYDES ET HYDROXYDES DE FER

L'individualisation des oxydes et hydroxydes de fer est presque toujours diffuse, le pH neutre ou faiblement acide ne permettant pas une ségrégation du fer sous la forme de concrétions. Elle se traduit par la coloration vive en brun-rouge, rouge, rouge-jaune d'un grand nombre de sols du bassin. L'hématite domine largement et la goethite est peu représentée.

Il s'agit d'un véritable processus de rubéfaction des sols. Sous les climats tichéen et éthiopien elle se produit en conditions de bon drainage sur les altérations basaltiques qui fournissent de grandes quantités de fer qui évoluent en hématite (sols fersiallitiques).

Sous les climats ogadénien et fickien les résidus d'altération des calcaires donnent une argile rouge dont la couleur peut encore « s'accroître » car comme le signale Lamouroux (1972) la rubéfaction progresse rapidement sur calcaire dur à altération pelliculaire, milieu aéré favorable à l'individualisation des oxydes de fer (ici hématite).

Il est essentiel de remarquer que ce sont les climats les plus humides qui sont les plus favorables à la rubéfaction (en condition de bon drainage), celle-ci étant réellement liée à l'apparition d'oxydes de fer secondaire à partir du fer inclus dans les minéraux primaires.

Les climats plus secs (fickien et ogadénien) accentuent faiblement la coloration d'un matériel hérité déjà rubéfié comme c'est le cas des argiles de décarbonatation des calcaires et aussi des produits de désagrégation des grès rouges (Riché, 1975).

7. CONCLUSION : LA ZONALITÉ CLIMATIQUE DE LA PÉDOGENÈSE (tabl. III)

Ainsi qu'on peut le déduire des considérations précédentes, les différents processus de pédogenèse sont apparemment fortement influencés par les conditions climatiques. En effet, les facteurs de formation des sols présentent, dans le bassin du Wabi Shebelle, les caractéristiques suivantes :

— La végétation ici, reflet très fidèle des conditions climatiques, se différencie par des étages bien

précis de végétation. Son influence pédogénétique peut donc être directement reliée au climat.

— Les roches-mères du Nord au Sud du bassin sont riches en bases (basaltes, calcaires, gypses) et constituent un facteur que l'on peut considérer comme constant dans la pédogenèse.

— Finalement, le climat est véritablement la seule variable susceptible d'orienter les processus de formation des sols.

Les conditions climatiques, très variées, qui règnent dans le bassin déterminent ainsi une véritable « zonalité climatique » de la pédogenèse, non pas liée à la latitude mais à l'altitude.

7.1. La variation des processus de pédogenèse en fonction du climat

SYNTHÈSES ET HÉRITAGE DE MINÉRAUX ARGILEUX

Les néosynthèses de minéraux argileux vont en augmentant d'intensité si l'on passe du climat de transition xérotérique tropical au climat tempéré froid. Ces synthèses concerneraient aussi bien les minéraux 1/1 (métahalloysite, kaolinite) que les minéraux 2/1 (illite). Par contre, les climats plus secs et plus chauds de transition du méditerranéen tropical ou tropical semi-aride sont favorables à la conservation des minéraux argileux hérités des roches-mères (principalement illite). Ceci en milieu bien drainé.

En milieu mal drainé, les smectites apparaissent sous tous les types climatiques (sauf sous climat tempéré froid) et caractérisent les vertisols. La néoformation de montmorillonite est forte sous climat tempéré et méditerranéen mais très faible sous climat équatorial semi-aride, ce dernier ne faisant que conserver un matériel montmorillonitique hérité, déjà présent dans le sol.

LA MATIÈRE ORGANIQUE

Il y a augmentation régulière du taux de matière organique des climats les plus secs et les plus chauds aux climats les plus froids et les plus humides. La corrélation est bonne avec l'indice de Martonne et le rapport P/ETP.

La nature de l'humus évolue aussi mais celui-ci reste du type mull calcique du climat tropical aride au climat de transition xérotérique tempéré où il tend à s'accumuler (chernozems). Il s'acidifie sous

climat tempéré (mull forestier) et devient très acide sous climat tempéré froid (mull acide).

Par contre, l'horizon pallide caractérise seulement le climat tropical semi-aride, les autres types climatiques étant favorables à la formation d'un horizon mélanique.

La dynamique des carbonates de calcium et de magnésium, du calcium et du magnésium

Sur matériau quaternaire, en milieu bien drainé, la décarbonatation augmente progressivement dans les horizons supérieurs quand on passe du climat méditerranéen au climat de transition méditerranéen tempéré, mais le complexe absorbant reste saturé en bases. Sous climat tempéré, le complexe commence à se désaturer et le processus s'accroît sous climat tempéré froid. En milieu mal drainé, l'accumulation calcaire sous forme de nodules friables est faible en milieu semi-aride, augmente sous le climat méditerranéen mais atteint son maximum sous le régime de transition méditerranéen-tempéré donnant naissance à des encroûtements massifs friables (chernozems). Elle diminue ensuite d'intensité et reprend la forme de nodules sous climat tempéré (vertisols).

Des accumulations anciennes de carbonates existent sur les plateaux du Sud du bassin. Elles donnent lieu à la formation soit de nodules durcis (climat tropical semi-aride) soit d'encroûtements massifs durcis (climat de type méditerranéen) qui ont commencé à se former sans doute à l'Eocène sous des climats déjà marqués par une forte aridité.

La dynamique du gypse et du chlorure de sodium

Le gypse se dissout, migre et s'accumule sous le climat tropical semi-aride. Il en est de même pour le chlorure de sodium mais ce dernier ne s'individualise que dans les conditions extrêmes d'aridité aux confins de la Somalie.

7.2. Les types climatiques, les types de pédogenèse et les sols

Le climat tempéré froid (Boraluku) facilite « l'allopphanisation » des matériaux ; la matière organique acide s'accumule. Là il se forme des andosols mélaniques désaturés.

Le climat tempéré (tichéen) plus chaud et un peu plus sec favorise la fersiallisation ; mais celle-ci est d'un type particulier caractérisé par des synthèses

d'illite et de métahalloysite. Un début de désaturation du complexe absorbant se manifeste dans les horizons supérieurs. Il se forme des sols fersiallitiques faiblement désaturés habituellement profonds.

Sous ce même climat mais sur forte pente, le processus de brunification est le propre des sols jeunes peu épais (sols bruns eutrophes) sur basalte. Mais l'évolution normale, si le sol s'approfondit, tend vers la fersiallisation.

Sous climat de transition xérotérique tempéré (guédébien), plusieurs processus pédogénétiques se chevauchent : synthèse d'illite et de kaolinite, décarbonatation complète des horizons A, accumulation de matière organique de type calcaire, accumulation calcaire en B sous forme d'un encroûtement friable massif : c'est la zone des chernozems.

Le climat de transition xérotérique tropical (éthiopien) favorise également la fersiallisation (comme le climat tichéen) mais la désaturation du complexe y est très faible à nulle. Il se forme des sols rouges fersiallitiques saturés.

Le climat de type méditerranéen (fickien) est déjà beaucoup moins agressif ; la dissolution du calcaire est plus faible que sous les climats précédents. Il se forme des sols calcimagnésiques carbonatés. Les carbonates solubilisés s'évacuent mal ; les nodules calcaires apparaissent en abondance dans les formations colluviales quaternaires, des encroûtements massifs durcis anciens se sont formés sur les plateaux où on a des sols à différenciation calcaire. Quand le drainage est bon et que les carbonates s'éliminent, on observe que des minéraux argileux 2/1 hérités se maintiennent, et que le complexe absorbant reste saturé. La montmorillonite apparaît à la base des profils. C'est le domaine de la fersiallisation (sensu stricto) avec formation de sols fersiallitiques saturés proches des sols rouges méditerranéens.

Sous climat tropical semi-aride (ogadénien), les synthèses de minéraux argileux sont très faibles, la montmorillonite elle-même est en grande partie héritée. Par contre, la rubéfaction est intense. Les sels de faible solubilité comme les carbonates de calcium et de magnésium sont peu mobiles et seul un temps très long a permis la formation sur les plateaux de nodules durcis donnant naissance à des sols à différenciation calcaire. Par contre, les sels les plus solubles, gypse et chlorure de sodium, peuvent être dissous et s'accumuler : c'est le domaine des sols à différenciation gypseuse et des sols halomorphes.

En condition de mauvais drainage, les vertisols apparaissent sous tous les types climatiques du bassin, sauf sous climat tempéré froid ; cependant, les climats tempéré et méditerranéen sont les plus favorables aux synthèses de montmorillonite. Les vertisols sont calciques sous climat tempéré mais sont en plus carbonatés sous les autres types climatiques plus secs. Ces derniers sont abondants sur

alluvions du Fafen et du Wabi Shebelle sous climat tropical semi-aride, pourtant peu propice à la formation de smectites, mais dans ce cas ils se situent presque uniquement sur matériaux d'apport, déjà montmorillonitiques.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 13 octobre 1976.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1963. — Cours de Pédologie, *ORSTOM*,
- AUBERT (G.), SEGALIN (P.), 1966. — Projet de classification des sols Ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 4 : 97-112.
- BAUDUIN (D.), DUBREUIL (P.), 1973. — L'inventaire des ressources en eau pour l'aménagement intégré du Bassin du Wabi Shebelle d'Ethiopie. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. X, n° 4 : 307-347.
- BOULAIN (J.). — 1961. — Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 253, 22 : 2568-2570.
- BOTHELO de COSTA (J.V.), 1959. — Ferrallitic, Tropical, Fersiallitic and Tropical Semi-Arid soils. Conf. Inter. afric. sols, 3, Dalaba 1 : 317-319.
- BUTZER (K.W.), HANSEN (C.L.), 1968. — Desert and river in Nubia, Madison Univ. Wisconsin Press, 562 p.
- DELVIGNE (J.), 1960. — L'altération des basaltes du Kivu méridional (Congo Belge). Thèse de Licence Louvain, multi-graphiée.
- DUCHAUFOUR (P.), 1970. — Précis de Pédologie. Masson, Paris : 150-159.
- FONTES (J.C.), MOUSSIE (C.), POUCHAN (P.), WEIDMANN (M.), 1972. — Phases humides au Pleistocène et à l'Holocène dans le Sud de l'Afar (T.F.A.I.). *C.R. Acad. Sci.*, D 277 (10) : 1973-1976.
- GASSE (F.), 1974. — Nouvelles observations sur les formations lacustres quaternaires dans la Basse-Vallée de l'Awash et quelques grabens adjacents (Afar, Ethiopie et T.F.A.I.). *Revue de Géogr. Phys. et de Géol. dyn.*, XVI (1) : 101-118.
- GASSE (F.), FONTES (J.C.), ROGNON (P.), 1974. — Variations hydrologiques et extension des lacs du désert Danakil. *Paléo. afr.*, 15 (2) : 109-148.
- LAMOUREUX (M.), 1972. — Etude des sols formés sur roches carbonatées, pédogenèse fersiallitique au Liban. *Mém. ORSTOM*, n° 56, 266 p.
- PECROT (A.), GASTUCHE (M.V.), DELVIGNE (J.), VIELVOYE (L.), FRIPIAT (J.J.), 1962. — L'altération des roches et la formation des sols au Kivu (République du Congo). Pub. I.N.E.A.C., n° 97, 90 p.
- RICHÉ (G.), SEGALIN (P.), 1973. — Les sols et le modelé dans le Nord-Est du Bassin du Wabi Shebelle (Ethiopie). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XI, n° 3/4 : 237-248.
- RICHÉ (G.), 1975. — Les sols du bassin du Wabi Shebelle et leur utilisation. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIII° n°s 3-4, 1975 : 195-221.
- RICHÉ (G.), SEGALIN (P.), QUANTIN (P.), LAMOUREUX (M.), 1974. — Les sols rouges de la partie Nord du Bassin du Wabi Shebelle (Ethiopie). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XII, n° 3/4 : 267-276.
- RUELLAN (A.), 1971. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). *Mém. ORSTOM*, n° 54, 302 p.
- SHAPMANN (Rudolph W.), 1971. — Climatic change and the evolution of the landform in the Eastern Province of Soudi Arabia. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 3 : 2713-2728.
- SWINDALE (L.D.), UEHARA (Cr.), 1968. — Ionic relationships in the pedogenesis of Hawaiian soils. *Proc. Soil. Sci. Soc. Am.*, 30 : 276-730.
- TAIEB (M.), 1972. — Recherches sur le Quaternaire continental de la vallée de l'Awash (zone du Rift). Ethiopie. *Paléo., afr.*, 6 : 109-113.