

GENÈSE ET ÉVOLUTION DE DEUX TOPOSÉQUENCES DE SOLS TROPICAUX DU TCHAD INTERPRÉTATION BIOGÉODYNAMIQUE

G. BOCQUIER*

Résumé d'une thèse présentée le 7 octobre 1971 à la Faculté des Sciences de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences Naturelles.

En région de climat tropical à saisons contrastées — comme la partie centrale du bassin tchadien — plusieurs types de sols peuvent se distribuer d'une manière régulière dans le paysage, alors que les roches mères demeurent homogènes. Ces successions ordonnées et systématiques de sols en fonction de la pente topographique sont appelées toposéquences. Le problème abordé est celui de leur déterminisme.

Les deux toposéquences, choisies comme objets d'étude, diffèrent par leur site et leur matériau originel :

— l'une, à Kossélili, est développée sur 150 m de longueur au pied d'un inselberg granitique. Régionalement c'est le piedmont granitique de la cuvette tchadienne.

— l'autre, à Mindéra, dérive d'alluvions quaternaires et se situe dans le bassin sédimentaire tchadien. Sa longueur est de 120 m.

La méthode d'étude utilisée consiste principalement à accorder le même intérêt aux variations latérales entre les profils qu'aux variations verticales dans les profils. Ces variations sont étudiées d'une manière sensiblement continue, et à plusieurs échelles, à la fois du point de vue morphologique et du point de vue analytique.

L'ORGANISATION MORPHOLOGIQUE

Composition pédologique et organisation générale de ces séquences

Les toposéquences de Kossélili et de Mindéra présentent toutes deux la même composition pédologique, c'est-à-dire la même succession ordonnée des types de sols de l'amont vers l'aval :

* S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M. - Bondy (France).

Sols lessivés-Lessivés hydromorphes-Planosols-Solonetz solodisés-Vertisols.

A cette importante variation des formations pédologiques sur une aussi courte distance, correspond également une variation des formations végétales, qui sont successivement des savanes arborées, arbustives, puis à caractère steppique.

Si l'on suit latéralement les principales limites d'horizons entre les différents profils, on relève une variation concomitante d'épaisseur des horizons lessivés A_2 et des horizons B d'accumulation et de transformation :

— les horizons lessivés A_2 dominent à l'amont (parfois même exclusivement comme à Kosséli) et diminuent puis disparaissent vers l'aval, alors que les horizons B augmentent pour constituer en totalité les profils des vertisols de l'aval.

— la limite entre les horizons A_2 et B est continue, mais de forme particulière : elle dessine des marches d'escalier, qui se rapprochent de la surface vers l'aval. A chaque palier, qui a une pente plus forte que celle de la surface du sol, correspond sensiblement un type de sol. Entre les paliers, les raccords sont légèrement obliques.

Cette géométrie régulière des horizons montre que l'organisation morphologique générale de ces séquences est à la fois *verticale dans chaque profil et latérale entre les différents profils successifs*.

Hiérarchie et succession des organisations micromorphologiques

A l'échelle des horizons, les analyses micromorphologiques permettent de distinguer trois organisations de base :

— *L'organisation éluviale* : c'est celle des horizons A_2 . Elle se définit suivant trois modèles d'organisation, qui caractérisent eux-mêmes trois types principaux d'horizons A_2 :

- Dans le premier, celui des horizons A_{2g} , le squelette domine et il se groupe en *traits laminaires* constitués par des grains fins déposés au sommet d'un ou de plusieurs grains grossiers. Des vides sous laminaires, à orientation horizontale, sont ainsi créés.

- Dans le second, le plasma se limite à des *illuviations discontinues*, qui se localisent dans les vides sous laminaires, et sont donc bien postérieures à ces vides. Ce sont les horizons A_{2gb} .

- Puis ces illuviations plasmiques peuvent elles-mêmes être à l'origine de *nodules ferrugineux ou ferri-manganésifères*, par ségrégation et diffusion des hydroxydes à travers le squelette voisin. Ces nodules, à allongement vertical ou horizontal, acquièrent à leur tour une coiffe de fin squelette, et l'horizon est dénommé $A_{2g\hat{c}n}$.

— *L'organisation illuviale* : c'est celle des horizons Bt. Des *illuviations continues* de plasma envahissent alors le squelette, qui conserve un arrangement en traits laminaires, acquis dans des horizons A_{2g} . De même, des traits pédologiques spécifiques d'horizons A_{2g} comme les nodules avec coiffe, se retrouvent dans les horizons Bt latéralement voisins. Ces horizons B illuviaux se forment donc dans d'anciens horizons A_2 . Dans ce cas, l'illuviation succède sur place à l'éluviation.

— *L'organisation de transformation* : c'est celle des horizons B structurés. Par leur comportement, les constituants illuviés ou néoformés (principalement argileux) transforment mécaniquement l'organisation illuviale précédente et même font disparaître l'arrangement du squelette primitivement de type éluvial.

Ces trois organisations de base : éluviale, illuviale et de transformation, se distribuent successivement dans l'espace, verticalement et latéralement, de l'amont vers l'aval. Dans le temps, elles se succèdent

aussi sur place en dérivant l'une de l'autre par départ, apport, puis transformation de matière. Le milieu éluvial devient un milieu d'illuviation puis un milieu de transformation. Il y a acquisition successive de caractères propres à ces trois milieux.

Il existerait donc une *séquence évolutive d'horizons* :

$A_{2g} - A_{2gb} - A_{2gcn} - Btg - B$ structuré.

Avec le temps, les horizons B — qui envahissent les horizons A_2 — remontent verticalement dans les profils et latéralement vers l'amont des toposéquences.

Il existerait parallèlement une *séquence évolutive des profils*, puisque ceux-ci sont composés de proportions variables de chacun de ces horizons. Et les profils aval de type accumulatif, comme les solonetz solodisés elles vertisols, ont tendance à envahir les sols éluviaux de l'amont.

Ainsi, dans ces toposéquences, *l'évolution pédologique apparaît-elle latérale et remontante*, aussi bien à l'échelle de l'organisation de base, que de celle des horizons, que de celle des profils.

L'APPORT DES DONNÉES ANALYTIQUES ET LA DÉFINITION DES MILIEUX BIOGÉOCHIMIQUES

Les données analytiques mesurent et localisent dans l'espace, les principales variations granulométriques, minéralogiques et géochimiques. En dressant des cartes d'isovaleurs dans chaque toposéquence, on détermine en particulier le sens de ces variations.

■ **Au point de vue granulométrique**, trois données se dégagent des résultats analytiques :

- L'argile granulométrique n'est pas la seule fraction susceptible de migrer. Lorsque le départ de fractions intermédiaires s'ajoute au départ d'argile, il se produit une importante concentration relative d'éléments grossiers dans les horizons A_{2g} .

- Les profils granulométriques révèlent que ces concentrations de grossiers se retrouvent également dans les horizons Bt illuviaux, immédiatement adjacents — verticalement ou latéralement — aux horizons A_{2g} . Des couples d'histogrammes montrent une analogie de distribution granulométrique des sables entre les horizons A_{2g} et Bt. Ceci confirme donc la possibilité de formation d'un horizon Bt par illuviation d'argile dans une granulométrie de type A_{2g} .

- Enfin, de l'amont vers l'aval, les profils granulométriques présentent des superpositions de plus en plus nombreuses de concentrations de fractions grossières et fines, qui témoignent d'une succession d'éluviation et d'illuviation remontantes dans ces profils.

■ **Au point de vue minéralogique** le fait primordial est l'opposition entre les milieux amont et aval de ces toposéquences :

- Le milieu amont est dominé par les minéraux primaires qui s'altèrent, et dont certains s'accumulent relativement.

- En revanche, dans le milieu aval, dominant des minéraux secondaires, qui s'y accumulent et s'y forment.

On met en effet en évidence une *accumulation relative de certains minéraux primaires à l'amont*. Il s'agit des feldspaths alcalins qui se concentrent, relativement plus que le quartz, dans les horizons A_{2g} . Cette concentration de caractère arkosique se retrouve également dans les horizons Bt illuviaux. Au point

de vue minéralogique, les horizons Bt ne diffèrent donc principalement des horizons A_{2g}, que par leur teneur en produits secondaires qui — micromorphologiquement — sont des produits illuviaux. Ainsi, en se formant au sein des horizons A₂, ces horizons Bt héritent donc aussi bien de la composition minéralogique, que de la distribution granulométrique, que de l'arrangement du squelette ou que des traits pédologiques, tous spécifiques d'horizons A₂.

Il existe par ailleurs une *distribution particulière des minéraux argileux* au long de ces toposéquences. Sur granite, par exemple, trois associations minéralogiques se succèdent de l'amont vers l'aval :

- Biotite-kaolinite
- Biotite-kaolinite-interstratifiés
- Montmorillonite-kaolinite-biotite.

Cette succession est ordonnée comme une suite minéralogique à quatre termes :

- la *biotite* est héritée, résiduelle ou détritique. Elle disparaît vers l'aval.
- la *kaolinite* est néoformée à partir de la biotite et des plagioclases. Elle migre, s'accumule et persiste à l'aval.
- les *interstratifiés* sont un stade fugace et localisé de la transformation de la biotite.
- la *montmorillonite*, absente de l'amont, évoque par sa brusque apparition et son accumulation aval, des transformations et des néoformations : transformations à partir des interstratifiés, néoformation à partir des plagioclases et des ions en voie de migration. La montmorillonite persiste alors à l'aval comme la kaolinite antérieurement formée et la biotite héritée.

Cette distribution suggérerait deux conclusions :

En un point donné de la toposéquence ou du paysage, la formation des minéraux argileux secondaires et la constitution d'un stock serait ainsi successive dans le temps.

Dans l'espace, cette acquisition serait également successive et la montmorillonite formée à l'aval, tendrait à envahir l'amont du paysage.

■ Au point de vue géochimique

La comparaison des distributions verticales de certains éléments permet de mettre en évidence des *migrations et des accumulations latérales*. Ainsi dans des horizons A_{2g}, au-dessus d'un palier en pente formé par des horizons B imperméables, le fer est déficient à l'amont alors qu'il s'accumule quelques mètres plus loin vers l'aval. En comparant ces variations du fer à celles du rapport fer/argile, on décèle aussi que le fer migre plutôt verticalement lorsqu'il est lié à l'argile, tandis que sa migration est latérale en milieu hydromorphe, où il est à l'état ionique ou à l'état de complexes organométalliques.

L'établissement de cartes d'isovaleurs pour de nombreux éléments géochimiques montre le *sens général de leurs variations* entre l'amont et l'aval. Les mêmes gradients latéraux existent dans les deux séquences. La localisation et l'intensité de ces gradients indiquent des différences de comportement, de mobilité pour les divers éléments géochimiques, et illustrent la migration et l'accumulation différentielle de ces éléments.

L'ensemble des données analytiques assurent la division de ces toposéquences en deux domaines ou milieux biogéochimiques :

- *Un domaine éluvial amont*, de granulométrie sableuse. C'est le milieu de l'hydrolyse acide des silicates primaires, avec accumulation relative de feldspaths alcalins et de quartz. La kaolinite s'y forme

et les minéraux micacés s'y dégradent. Les hydroxydes métalliques peuvent s'immobiliser sous forme de nodules.

— *Un domaine d'accumulation aval.* Il est argileux, confinant et alcalin. Il renferme des accumulations de squelette fin, de kaolinite et d'hydroxydes. Mais il se caractérise surtout par la montmorillonite qui s'accumule, soit par transformation des minéraux micacés hérités, soit par néoformation. Le calcaire s'immobilise également dans ce milieu et le sodium se fixe sur le complexe absorbant

L'INTERPRÉTATION BIOGÉODYNAMIQUE

Ces séquences peuvent être considérées comme des systèmes biogéochimiques dans lesquels la *migration latérale et différentielle des éléments* relie le milieu éluvial amont au milieu d'accumulation aval, enchaîne les différents types de sols, et différencie un paysage biogéochimique.

Mais ces deux milieux amont et aval sont plutôt *interdépendants* que subordonnés l'un à l'autre. En effet les accumulations une fois réalisées à l'aval influent à leur tour sur les altérations et les migrations amont, en modifiant les conditions hydrodynamiques et physicochimiques.

Les accumulations sont ordonnées dans les horizons B suivant l'ordre inverse des migrations. Cette séquence des accumulations dans les horizons B, débute en effet à l'aval et en profondeur par les constituants les moins mobiles : le squelette fin. Viennent ensuite les argiles kaoliniques, les hydroxydes, la montmorillonite, les carbonates, puis le sodium.

Chaque type d'horizon B constitue alors pour les migrations verticales et latérales, une micro-barrière spécifique suivant sa propre composition. Ces différentes *barrières géochimiques* sont, soit mécaniques (d'imperméabilité et de concentration), soit physicochimiques (d'oxydo réduction, d'acidité-alcalinité, d'adsorption). Elles sont échelonnées sur les marches successives de la limite entre les horizons A₂ et B, et elles transforment ce front d'accumulation dans le paysage en un filtre géochimique complexe.

Les accumulations successives se réalisent au seuil de ce filtre et le front d'accumulation tout entier progresse vers le domaine éluvial amont en remontant vers la surface et en remontant la pente. Ainsi la matière migre de l'amont vers l'aval. Mais l'accumulation s'effectue de l'aval vers l'amont. Pris aux pièges biogéochimiques successifs, les différents constituants de cette matière s'accumulent à partir de l'aval dans l'ordre inverse de leur migration. Ainsi, le domaine d'accumulation aval envahit le domaine éluvial amont. L'évolution générale de ces systèmes biogéodynamiques est *latérale et remontante*.

Quelques datations par la méthode isotopique au radiocarbone, confirment le sens de cette évolution. On a daté en effet l'accumulation de carbonates dans des horizons analogues, mais dans des positions aval et amont des deux séquences. Dans les deux cas, les nodules calcaires les plus récents sont bien localisés à l'amont (par exemple 2710 BP à l'amont et 8570 BP à l'aval pour Kossélili), ce qui implique la remontée vers l'amont de cette accumulation calcaire.

Enfin ces systèmes biogéodynamiques apparaissent être dotés d'un *auto-développement*. Les horizons, les sols ou les milieux biogéochimiques qui constituent ces toposéquences sont en effet interdépendants dans l'ensemble naturel où ils évoluent. Cet ensemble possède son propre déterminisme qui est le développement des termes accumulatifs aval aux dépens des termes éluviaux amont. Les facteurs externes n'agissent pas séparément sur chaque type de sol mais plutôt sur l'ensemble du système biogéodynamique.

LES APPLICATIONS DE L'INTERPRÉTATION BIOGÉODYNAMIQUE

■ La distribution des sols dans les zones bioclimatiques

En raison du seul autodéveloppement de ces systèmes naturels, et lorsque les facteurs externes demeurent constants, la *distribution des sols dans le paysage ne serait donc fonction que de l'âge*, c'est-à-dire de la durée d'évolution de ces systèmes. Ainsi l'extension dans un paysage de types de sols d'accumulation — comme les vertisols en climat tropical contrasté — ne dépendrait que du temps.

Cependant si l'on se réfère aux deux cas étudiés, où les séquences apparaissent avoir le même âge, on constate que leur composition relative diffère : les solonetz dominant à Kossélili, les vertisols à Mindéra. Cette différence peut être alors imputée aux *variations des facteurs externes* depuis l'holocène. Les principales variations, connues depuis cette époque dans le bassin tchadien, sont doubles :

— l'assèchement climatique a joué pour les deux séquences. Il a pu favoriser l'envahissement des paysages par les sols à montmorillonite.

— les actions tectoniques ont été opposées dans les deux régions. La tectonique positive du piedmont granitique favoriserait le développement des solonetz en améliorant le drainage externe. Les vertisols se développeraient plutôt lors de la subsidence du bassin sédimentaire.

On décèle ainsi l'action des facteurs externes sur l'autodéveloppement, et en particulier l'influence possible de la tectonique sur la distribution des sols. Ceci semble confirmé dans le bassin tchadien, par le fait que les solonetz solodisés prennent une extension croissante vers l'est du piedmont, lorsque précisément les déformations tectoniques augmentent d'amplitude dans cette direction.

Par ailleurs, la *distribution des sols dans les paysages peut être reliée à la distribution générale des sols à travers les zones bioclimatiques*. Dans chacune des zones bioclimatiques du bassin tchadien, on observe en effet sur des surfaces comparables, des toposéquences où la succession ordonnée des sols est analogue, mais dans lesquelles la composition relative varie en fonction du gradient climatique. En climat humide, les sols lessivés dominent dans les séquences ; en climat plus aride, ce sont les solonetz solodisés et les vertisols. Ainsi la zonalité bioclimatique correspondrait, dans ce cas, à la dominance successive de chacun des différents termes de la même toposéquence générale.

Le gradient climatique, et en particulier le gradient de pluviosité en régions tropicales, jouerait donc un *rôle analogue au temps* dans la distribution des sols, en réglant les distances et les vitesses de migration.

■ Géochimie des paysages intertropicaux

Les éléments géochimiques se distribuent latéralement dans les paysages suivant leur mobilité et les barrières géochimiques qu'ils rencontrent successivement dans leur migration : ainsi POLYNOV a-t-il défini la « géochimie des paysages ».

On peut préciser que des hydrolyses amont nourrissent des néoformations aval, qui correspondent elles mêmes à des *accumulations absolues*. Mais les hydrolyses amont donnent aussi naissance sur place à des néoformations qui sont des *accumulations relatives*. Un paysage biogéodynamique doit donc être défini par l'*association géochimique* de ses accumulations relatives de l'amont et absolues de l'aval.

Dans les deux cas étudiés, les paysages se définissent par l'association kaolinite (en accumulation relative amont) et montmorillonite (en accumulation absolue aval).

Mais ces associations varient suivant le climat, et en domaine intertropical, une *séquence climatique des associations géochimiques de paysage*, peut être esquissée :

— *en domaine équatorial*. L'allitisation accumule relativement de la gibbsite à l'amont, alors que les produits de cette allitisation profonde et ceux d'une dégradation superficielle, entretiennent des néoformations aval de kaolinite (monosiallittisation). Cette accumulation absolue de kaolinite limite le drainage latéral et a tendance à envahir l'amont ; elle fixe des hydroxydes et se surimposant à l'allitisation, acquière ainsi l'ensemble des caractères majeurs des sols ferrallitiques.

— *en domaine tropical humide*. La monosiallittisation entretient à l'amont l'accumulation relative de kaolinite. En bas de pente se réalise l'illuviation kaolinique et celle-ci crée à son amont des conditions favorisant la migration et l'accumulation absolue des hydroxydes : c'est le phénomène de cuirassement, qui épigénise des organisations éluviales et progresse en remontant vers l'amont.

— *en domaine tropical sec*, qui correspond aux deux toposéquences étudiées, l'association est celle de la kaolinite amont et de la montmorillonite aval, qui tend à envahir le paysage.

— *en climat plus aride*, la bisiallittisation est généralisée et des accumulations absolues de calcaire se manifestent à l'aval. Les faciès de l'encroûtement calcaire peuvent apparaître remarquablement convergents avec ceux du cuirassement, notamment par la succession verticale et latérale des faciès massifs, lamellaires et nodulaires.

— *avec une aridité plus grande encore*, on assisterait à la naissance de l'attapulгите au sein des carapaces calcaires. Puis, c'est en domaine désertique l'apparition des dernières paragénèses, avec les concentrations salines et la néoformation de silicates alcalins.

Ainsi le milieu continental n'est pas seulement un milieu d'altération et de migration. Il possède aussi, dans ses paysages, ses propres *accumulations biogéochimiques*, qui pour une même roche mère sont fonction du temps et du climat. Ces accumulations de paysage se distribuent d'une manière convergente aux accumulations sédimentaires, dont elles ne se distingueraient principalement que par une organisation interne spécifique.

■ Evolutions des versants et du régime des eaux

Dans ces régions tropicales à saisons contrastées, l'évolution des versants est marquée, à la fois par leur recul avec déplacement de la rupture de pente vers l'amont, et à la fois par leur aplanissement avec diminution des pentes aval. Dans les paysages étudiés, il y a précisément à cette rupture de pente redistribution latérale et interne de matière et déplacement du front d'accumulation vers l'amont. Recul et aplanissement de ces versants pourraient donc correspondre à l'invasion remontante de ces accumulations biogéochimiques par migrations latérales internes, plutôt qu'aux seules actions superficielles d'érosion et d'accumulation sédimentaire.

L'invasion de ces paysages par certaines accumulations biogéochimiques, comme celle de la montmorillonite, a aussi pour conséquence de développer un écran imperméable superficiel, qui modifie profondément le régime des eaux. Avec le rythme saisonnier, ces surfaces aplanies sont en effet alternativement saturées, sinon inondées, puis sévèrement desséchées, sans que puisse se réaliser une alimentation des nappes en profondeur.

Ainsi, ces phénomènes biogéodynamiques, en réglant l'évolution des versants et du régime des eaux, conditionnent gravement la mise en valeur agricole, sinon l'implantation humaine dans ces régions tropicales.