

## ÉTUDE DE SOLS FORMÉS SUR ROCHES CARBONATÉES (Pédogénèse fersiallitique au Liban)

M. LAMOUROUX

*Résumé d'une thèse présentée en mars 1971 à la Faculté des Sciences de l'Université de Strasbourg pour obtenir le grade de Docteur es Sciences Naturelles.*

### LE MILIEU NATUREL

Le milieu libanais présente les particularités suivantes :

- climat méditerranéen extrêmement pur, avec une saison absolument sèche d'avril à octobre, et un hiver très pluvieux ;
- précipitations variant de 200 mm dans le nord de la haute plaine de la Bekaa à près de 1 500 mm sur les sommets du Mont Liban ;
- montagnes du Liban et de l'Anti-Liban presque exclusivement formées de roches carbonatées variées, avec quelques grès et basaltes venant rompre cette monotonie lithologique.

Le comportement en surface des formations géologiques a permis d'établir un schéma lithomorphologique facilitant la compréhension des processus de pédogénèse. Les roches dures carbonatées favorisent la formation d'un relief karstique plus ou moins érodé et déchiqueté :

- le « karst fermé » est un karst parfait, souvent ruiniforme, où les sols ne subsistent qu'au fond de profondes fissures dans les dolines isolées ;
- le « karst couvert » est un karst noyé sous un manteau plus ou moins épais de sols rouges fersiallitiques.

Les roches tendres carbonatées sont plus facilement altérées et présentent un paysage aux molles ondulations. Les sols y sont souvent très calcaires et fortement érodés.

Les grès et les formations basaltiques sont également très érodés et contribuent à alimenter les glacis, les cônes de piedmont et les plaines environnantes.

### LES SOLS LIXIVIÉS

1) *Les sols rouges fersiallitiques du karst fermé ou ouvert* présentent en surface des couleurs très foncées, assombries par la matière organique. La texture est très argileuse (60 à 90 %), riche en pseudo-

particules de la taille des limons et des sables fins, Le gradient d'argile (inférieur à 1/1,4) n'est pas lié à un lessivage des particules fines du sol. Il a en effet été montré expérimentalement que l'entraînement par lessivage ne se produisait pas dans les conditions de précipitations actuelles et dans un milieu riche en réserves carbonatées.

Des cutanes d'illuviation n'apparaissent pas ; par contre des cutanes de pression (reproduits expérimentalement) sont très abondants du sommet à la base des profils, même dans les vertisols rouges. La décalcarification est totale, mais des recalcifications secondaires peuvent se produire en régions subhumides à semi-arides. Les altérations des roches sont de type pelliculaire (LAMOUREUX, 1966). La structure est polyédrique fine dans le B et s'organise en surstructure secondaire ou tertiaire, prismaticocubique dans les larges poches. La cohérence à l'état sec est faible, la perméabilité est très bonne et les racines pénètrent profondément. Le profil ne présente que de très faibles différenciations inter-horizons. Il est du type A(B) (B de couleur et de structure). l'horizon C se réduit aux pellicules d'altération, mais C comme R sont irrégulièrement répartis dans le profil ou autour du profil.

2) *Les sols fersiallitiques du karst couvert* forment un manteau de sols souvent épais et dont les parties supérieures sont coupées de leur approvisionnement calcique. Ces sols présenteront donc un certain lessivage caractérisé par un très fort gradient d'argile et surtout par l'existence de quelques cutanes d'illuviation. Suivant la pente, des remaniements plus ou moins importants se produisent entraînant sur pente forte la dénudation du karst ; sur pente moins forte, l'entraînement des particules fines de surface et l'accumulation de sables en bas de pente ; sur pente faible, l'accumulation d'argile en bas de pente. La présence de ces sols épais, riches en pédorelictés, sous un climat subhumide (7 à 800 mm), indique une action de la pédogenèse beaucoup plus ancienne et prolongée que dans les sols des karsts fermés ou ouverts.

3) *Les sols rouges fersiallitiques des glacis et piedmonts* de la Bekaa sont formés sur un matériau déposé vers le milieu du quaternaire et sous des précipitations de 400 à 600 mm.

Les remaniements d'origine sont parfois encore visibles ; en lames minces, le plasma des sols présente une faible organisation, avec des séparations plasmiques diffuses ; l'évolution des minéraux argileux est nulle. Seules la matière organique et la structure marquent un certain degré d'évolution. Il s'agit donc de sols peu évolués d'apport sur lesquels la pédogenèse a très peu marqué.

#### LES SOLS CONFINÉS HYDRATÉS

Des sols ou des horizons de sols présentent une couleur brun foncé en surface, brun jaune en profondeur. La texture est très argileuse et le gradient d'argile est prononcé. La décalcarification du profil est parfois totale, mais souvent le calcaire s'accumule en profondeur sous forme diffuse, de nodules et même d'encroûtements. L'altération des roches carbonatées ne se produit qu'en surface ou quand il n'y a pas accumulation de calcaire, c'est-à-dire en milieu très peu confinant. La structure de ces sols est polyédrique et s'organise en une surstructure grossière dont les éléments sont extrêmement cohérents à sec.

Une des caractéristiques essentielles de ces sols est la transformation des produits ferrugineux amorphes de couleur rouge en un produit cristallisé, la goethite, de couleur jaune. Les différenciations dans ces sols bruns sont plus nettes que dans les sols rouges. Ils sont du type A(B)R ou A(B) B<sub>Ca</sub>R.

L'apparition de la couleur brune est liée à un drainage déficient, dû à la présence d'un niveau imperméable en profondeur ou dans le profil même, à l'obturation des fissures du karst, à une concentration anormale d'eau en bas de pente, etc.

Ces conditions de milieu favorisant la transformation des produits ferrugineux amorphes peu hydratés en goethite hydratée et cette formation de goethite elle-même justifient le terme de sol brun hydraté utilisé pour désigner ces sols.

## L'ALTÉRATION DES ROCHES CARBONATÉES

L'étude sur l'altération des roches carbonatées a permis de distinguer plusieurs types d'altération : une altération de surface appelée altération pelliculaire sur roches dures carbonatées, une altération profonde et progressive sur roches carbonatées moyennement dures et un effritement du matériau sur roches tendres carbonatées.

— La vitesse de l'altération d'une roche carbonatée, par rapport à la vitesse d'évacuation des matériaux ainsi préparés, conditionne les teneurs en calcaires des sols formés et corrélativement leur degré d'évolution.

— L'altération pelliculaire a un rôle fondamental dans la formation des sols fersiallitiques. Elle peut être décomposée en quatre stades :

- la préparation d'un cortex d'altération partiellement dissous par les eaux du sol ;
- l'arrachement de ce cortex en une mince pellicule de carbonates, collée au sol ;
- la dissolution des carbonates de la pellicule ;
- la mise en place des résidus insolubles, après dissolution des carbonates.

— Un rôle prépondérant est attribué aux périodes sèches et humides, à la suite d'expérimentations en tubes reproduisant le rythme cyclique de l'altération pelliculaire.

— Les exportations des différents ions des sols et des roches ont été mesurées sur des solutions du sol, sur des eaux de percolation et de ruissellement. Un ordre relatif des solubilités décroissantes a pu être établi :



— Les résidus des roches carbonatées sont qualitativement semblables aux constituants des sols, mais certaines proportions peuvent varier au cours des altérations. Leur couleur brune indique par ailleurs que la rubéfaction est un phénomène pédogénétique.

Quantitativement il n'est pas paradoxal de penser que l'insoluble des roches carbonatées ait pu être à l'origine des sols observés, ce que nous montre un calcul simple et rapide.

## LES MINÉRAUX ARGILEUX DES SOLS ET DES ROCHES CARBONATÉES

1) L'évolution des minéraux argileux a été étudiée dans des profils et le long de chaînes de sols. Elle est fonction des précipitations et des milieux de pédogénèse.

*En milieux lixiviés, bien drainés* : sous plus de 1 000 mm de précipitations, les minéraux argileux de type illite évoluent vers la vermiculite, associée à des interstratifiés 10-14<sub>v</sub>. La montmorillonite se dégrade nettement en surface, tandis que sur tuf basaltique la kaolinite peut se néoformer, associée à de la montmorillonite. Entre 600 et 1 000 mm l'évolution des minéraux argileux de type illite s'arrête aux interstratifiés 10-14<sub>M</sub> ou 10-14<sub>v</sub>, la montmorillonite n'évolue que très peu et se néoforme sur tuf basaltique. En-dessous de 600 mm, les minéraux argileux ne présentent aucune évolution.

*En milieux drainant bien*, mais confinés en calcium des régions semi-arides, aucune évolution ne se fait.

*En milieux confinés hydratés*, à drainage ralenti, il y a silicification des interstratifiés pour donner de la montmorillonite sous plus de 1 000 mm. Une faible évolution de ce type est perceptible entre 600 et 1 000 mm, mais rien ne se produit sous 600 mm de précipitations.

*En milieux confinés hydromorphes, drainant mal*, il y a concentration en silice et en cations divers du fait des apports latéraux et de fortes évapo-transpirations. Une silicification des interstratifiés et une néoformation de montmorillonite peuvent se produire.

*En milieux arides, très fortement confinés* des attapulgites se sont formées et sont conservées dans les croûtes et encroûtements riches en carbonates de calcium et de magnésium.

2) Les mécanismes de l'évolution des minéraux argileux sont de trois types :

— *des héritages* sont à l'origine d'une grande partie des argiles des sols du Liban. Dans de nombreux sols formés sur grès et sur roches carbonatées, les minéraux argileux sont identiques à ceux des roches ou partiellement transformés par des hydrolyses modérées ;

— *des transformations*, résultats de ces hydrolyses, marquent surtout les produits de type illite qui aboutissent à des interstratifiés, à de la vermiculite et à de la montmorillonite ;

— *des néoformations* ont pu être mises en évidence dans les sols hydromorphes de bas de pente où un fort confinement conduit à la montmorillonite sous climat subhumide à semi-aride et à l'attapulgite sous climat aride.

Malgré l'importance de l'héritage, les minéraux argileux et surtout l'illite, sont très sensibles aux variations climatiques et constituent un excellent indicateur de l'évolution des sols. Ils peuvent permettre de déceler l'origine et l'homogénéité d'un matériau. Leur degré d'évolution est un des caractères essentiels des sols fersiallitiques.

#### LES FORMES LIBRES DE SILICE, D'ALUMINE ET DE FER DANS LES SOLS ET LES ROCHES CARBONATÉES DU LIBAN

##### 1) *Les formes cristallines*

Dans la fraction fine des sols fersiallitiques du Liban, le quartz est peu abondant (moins de 1 %) en régions humides, mais peut atteindre quelques pour cent en régions sèches. Le fer cristallin est très peu représenté à l'état d'hématite, par contre la goethite est abondante dans les sols bruns hydratés (5 à 8 %) et dans les sols fersiallitiques des régions humides (3 à 5 %). Elle l'est moins dans les sols calcaires et autres types de sols. L'alumine cristalline n'est décelée qu'à l'état de traces de gibbsite dans de rares échantillons.

##### 2) *Les formes amorphes*

La silice amorphe, comme le quartz, est très faible dans les sols des régions humides, mais représente des quantités notables dans les sols des régions sèches.

Bien qu'étudiée sur un nombre réduit de profils, l'alumine amorphe semble augmenter proportionnellement à l'alumine totale de la roche saine à la surface du sol. L'alumine libre et amorphe serait due à la dégradation de minéraux argileux dans les horizons supérieurs et enrichirait les solutions des sols de bas-fonds où se produisent des néosynthèses argileuses.

*Les sesquioxydes de fer amorphes* ou qui paraissent amorphes aux rayons X sont abondants dans les roches carbonatées. Après dissolution des carbonates ils se transforment différemment suivant la nature du milieu. En milieu lixivié, bien décarbonaté, les sesquioxydes de fer amorphes et bruns au départ sont libérés par les dissolutions et ont tendance à cristalliser, mais rapidement ils sont adsorbés à la surface des minéraux argileux où leur cristallisation se trouve stoppée. Cette transformation, à l'état de préhématite, produit ferrugineux paraissant encore amorphe aux rayons X, entraîne une sélection des rayons lumineux réfléchis dans les parties rouges du spectre.

Telle est l'hypothèse proposée pour expliquer la rubéfaction des sols fersiallitiques en régions humides. Dans les régions sèches et chaudes, malgré l'effet inhibiteur des surfaces des minéraux argileux, une déshydratation lente et progressive des sesquioxydes de fer semble être possible et conduire à des formes de plus en plus cristallines et se rapprochant de l'hématite.

En milieu confiné hydraté, des réductions et des dissolutions saisonnières de sesquioxydes de fer peuvent se produire. Ce fer dissous, au contact de solutions basiques (pH voisin de 9) riches en  $\text{HCO}_3$ , se transforme en goethite, d'autant plus facilement que la goethite préexistante joue le rôle de germe de cristallisation. La couleur du sol devient brun rouge à jaune.

En milieu confiné hydromorphe, de la goethite peut se former, mais une partie du fer peut également entrer dans la constitution des édifices argileux néoformés.

## CONCLUSIONS

### 1) Sols du Liban et milieux de pédogénèse

Les différents sols étudiés peuvent se regrouper en fonction de la nature des milieux de pédogénèse :

— en milieu bien drainé et lixivant, « le système d'agressivité » est maximum sous de fortes précipitations (plus de 1 000 mm) et des transformations relativement importantes se produisent. Sous des précipitations plus faibles (moins de 1 000 mm), les transformations sont réduites. Dans ce milieu le sol perd des constituants par lixiviation, mais en regagne du fait des altérations ou d'apports extérieurs :

— en milieu conservateur, les transformations sont minimes ;

— en milieu drainant bien et confinant, sous climat semi-aride, des accumulations de carbonates de calcium apparaissent dans des matériaux n'évoluant que très peu par ailleurs ;

— en milieu à drainage ralenti, confiné hydraté, les dégradations sont limitées aux horizons de surface, tandis qu'en profondeur des accumulations de carbonates, des silicifications de minéraux argileux et des transformations de sesquioxydes de fer se produisent ;

— en milieu mal drainé, confiné hydromorphe, aux transformations précédentes peuvent s'ajouter des néoformations de montmorillonites ferrifères.

### 2) Sols rouges lixiviés du Liban et sols fersiallitiques

Les sols rouges lixiviés du Liban sont des sols fersiallitiques. Il est proposé d'élever l'ancienne sous-classe fersiallitique au niveau de la classe et d'y distinguer une sous-classe de sols saturés (plus de 90 %) et une sous-classe de sols désaturés (40 à 90 %). Dans chaque sous-classe, les groupes suivants apparaîtraient : modal, mollique, hydraté, appauvri et remanié. Les sous-groupes se différencieraient par des caractères secondaires vertiques, hydromorphes, par les types de remaniement, etc.

Les critères fondamentaux de cette classe seraient d'une part la nature minéralogique du complexe argileux formé d'argiles kaolinitiques et/ou de smectites, souvent de type illite quand les hydrolyses sont modérées ; d'autre part, la nature et la répartition des sesquioxydes de fer dans le profil. La teneur en fer est importante, d'autant plus que la texture est plus argileuse. Les produits ferrugineux ne sont pas ou très peu indurés et sont bien répartis dans le profil. Les sesquioxydes de fer amorphes sont abondants, ils sont adsorbés aux minéraux argileux ou complexés par la matière organique et ils donnent aux sols leur couleur rouge (10 R à 2,5 YR). Des formes cristallines de fer peuvent exister, ainsi que du fer inclus dans les octaèdres des minéraux argileux.

Les sols fersiallitiques, ainsi définis, se limitent à des sols bien drainés excluant les sols bruns hydratés à drainage ralenti et les sols ferrugineux tropicaux mal drainés. Ils se situent entre les sols ferrallitiques et les sols bien drainés des régions tempérées (calcimagnésiques ou brunifiés). Ils couvrent une aire géographique s'étendant de régions tropicales à deux saisons contrastées, aux régions à climat méditerranéen, mais ils semblent être très peu fréquents en régions tempérées (fonction des limites conventionnelles fixées à la classe, en particulier pour les taux de sesquioxydes de fer amorphes).