

EVOLUTION DES MINÉRAUX ARGILEUX DANS LES SOLS DU LIBAN

M. LAMOUROUX

H. PAQUET

G. MILLOT

Introduction

Dans une note préliminaire (LAMOUROUX *et al*, 1967), nous avons proposé un certain nombre de conclusions partielles sur l'évolution des minéraux argileux, des altérations et des sols du Liban. Des travaux ultérieurs portant sur des profils et des chaînes de sols ont permis d'établir un tableau plus complet de l'évolution de la matière silicatée des sols du Liban (PAQUET, 1969; LAMOUROUX, 1971).

L'objet de cette note est de résumer les principaux types d'évolution observés, d'en étudier les mécanismes et de les situer dans leur cadre pédologique.

1. LE MILIEU ET LES SOLS

L'étude du milieu et des sols du Liban (LAMOUROUX, 1971) a permis de mettre en évidence :

— une région montagneuse essentiellement karstique et soumise à des précipitations élevées (plus de 1000 mm). Les sols se développent dans le karst sous forme, soit de poches très profondes disparaissant dans les fissures (karst fermé), soit de poches plus superficielles et plus ou moins anastomosées entre elles (karst ouvert). De tels sols, situés sur une même pente, ne sont pas liés génétiquement ou le sont très peu, malgré une très lente descente des matériaux des poches amont vers les poches aval. Les exutoires naturels de poches karstiques sont les fissures et les fentes profondes du karst;

— une région de plateaux de type subhumide (600 à 1000 mm). Au Nord sur les coulées basaltiques tertiaires, des sols bruns souvent érodés se sont développés. Au Sud sur roches carbonatées, des sols très variés ont été étudiés, mais l'intérêt pédologique est surtout porté aux sols recouvrant plus ou moins complètement les zones

- 8 AVR. 1974⁵³

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

Collection de Référence

n°

6747 Pedo

karstiques (karst ouvert). Les sols forment souvent un manteau continu et sont liés génétiquement les uns aux autres le long d'une même pente;

— une région de piedmonts aux précipitations plus faibles (environ 600 mm) et située de part et d'autre de la haute plaine de la Bekaa. Les sols se sont développés sur des matériaux colluvionnés (cônes de déjection, glacis d'accumulation) et sont également liés génétiquement les uns aux autres;

— en plaine, les sols sont engorgés une grande partie de l'année, d'autant plus que les précipitations sont fortes et que les apports d'eau des pentes voisines sont élevés. Dans les hautes plaines semi-arides et arides, les engorgements sont très localisés, tandis que les accumulations calcaires y sont souvent abondantes.

2. MINÉRAUX ARGILEUX DE PROFILS ET DE CHAINES DE SOLS

Avant de décrire les faits, il faut signaler que la caractérisation des sols étudiés a été faite selon la classification française (1967), excepté pour les sols bruns hydratés définis par LAMOUROUX (1968). Les numéros dont sont affectés les profils cités renvoient aux caractéristiques et aux descriptions détaillées de ces sols et chaînes de sols in LAMOUROUX (1971).

La détermination et l'estimation des minéraux argileux a été effectuée selon la méthode mise au point par LUCAS (1962), modifiée pour les sols par PAQUET (1969). Les principaux sigles utilisés I-(10-14_M), I-(10-14_M)-M, (10-14_M)-M représentent des étapes successives allant dans le sens d'une transformation croissante de l'illite vers la montmorillonite. C'est-à-dire que, partant de l'illite, on observe des particules argileuses interstratifiées comportant de plus en plus d'interfoliaires gonflants, jusqu'à ce que l'on aboutisse à la montmorillonite. Les mêmes types de symboles ont été utilisés pour les étapes de transformation entre l'illite et la vermiculite, ex. : I-(10-14_V)-V et entre la chlorite et la montmorillonite, ex. : (14_C-14_M).

2.1. Dans les régions humides montagneuses

Les régions étudiées correspondent essentiellement au versant ouest du Mont-Liban, recevant en moyenne 1000 à 1500 mm de pluie. Les températures varient près de la côte de 15°C en hiver à 27°C en été et, en haute montagne, de 0°C en hiver à 16°C en été.

2.1.1. Sols formés sur grès

Ce sont des sols fersiallitiques, de couleur rouge ou brune. Ils sont lessivés ou appauvris en éléments fins, souvent partiellement

désaturés. Les minéraux argileux présentent dans la roche-mère une forte proportion de kaolinite (70 à 90 %) qui va en diminuant vers le haut du profil. L'illite et les interstratifiés illite-montmorillonite s'altèrent dès la base des profils pour aboutir dans les horizons supérieurs à la vermiculite.

2.1.2. Sols formés sur roche carbonatée

— En milieu bien drainé, l'illite de profils de sols rouges fersialliti-

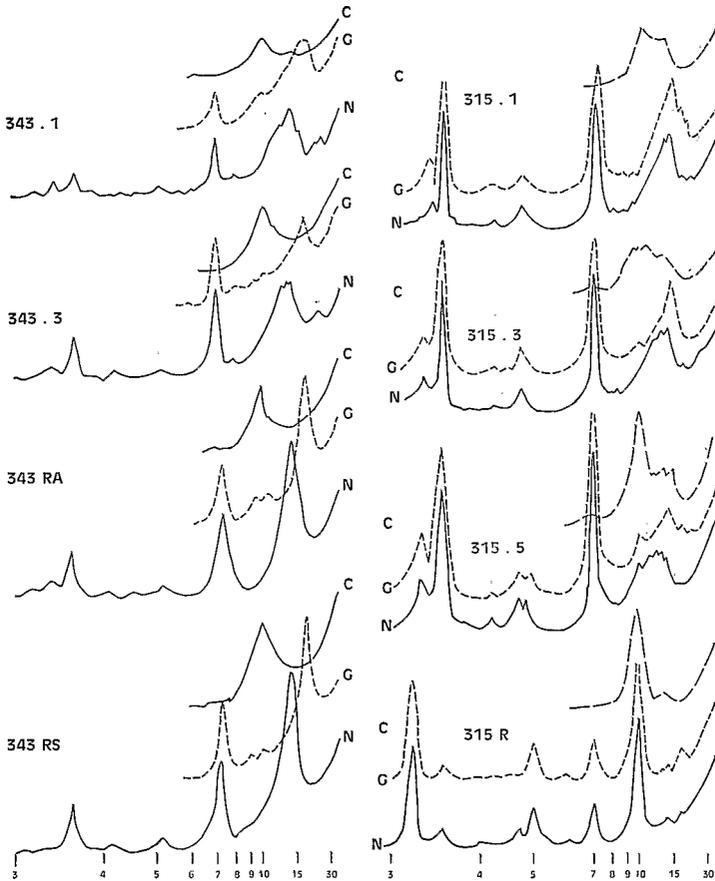


Fig. 1

Régions pluvieuses de montagne. Profils sur karst.

315 : Evolution de la fraction argileuse vers la vermiculite

343 : Evolution de la fraction argileuse vers la montmorillonite

N = diagramme correspondant à l'échantillon naturel, non traité

G = diagramme correspondant à l'échantillon traité à l'éthylène-glycol

C = diagramme correspondant à l'échantillon chauffé à 490°C

ques présente une évolution allant également vers la vermiculite, associée à des interstratifiés illite-vermiculite. Dans certains de ces profils, la kaolinite est beaucoup plus abondante dans le sol que dans la roche et peut même ne pas exister dans la roche-mère (profil L.315, fig. 1). Dans le profil L.343 (fig. 1), la kaolinite et la montmorillonite se maintiennent de la roche au sommet du profil, mais la montmorillonite se dégrade en surface. Enfin, dans un profil peu épais sur dolomie sableuse (L.404), l'évolution des minéraux argileux est très faible.

— *En milieu à drainage ralenti*, les interstratifiés I-(10-14_M)-M des sols bruns hydratés évoluent vers la montmorillonite au sommet des profils. Ici également, la kaolinite est plus abondante dans le profil que dans la roche-mère où elle peut ne pas exister (L.344). Un net accroissement de la kaolinite de la base vers l'horizon supérieur, est également observé dans trois autres profils (L.225-226-380).

2.1.3. Sols formés sur tuf basaltique

A titre comparatif, l'analyse d'un sol fersiallitique (L.414) sur tuf basaltique et sous 1300 mm de précipitations fait apparaître une forte proportion de montmorillonite et un peu de métahalloysite (10 %) dans le tuf peu altéré et une augmentation très nette de kaolinite dans le sol.

2.2. Dans les régions subhumides de plateau

Les régions de plateau sont situées au Nord et au Sud-Ouest du Liban, sous des précipitations de 600 à 1000 mm. Les températures y sont un peu plus fortes qu'en montagne et surtout les saisons sèches y sont plus marquées.

2.2.1. Sols formés sur karst ouvert

— *En milieu bien drainé*, les minéraux argileux des sols fersiallitiques saturés du karst ne subissent pas une évolution très marquée. Les illites ouvertes de la roche-mère sont encore présentes à la base des profils (L.319 et L.373), mais disparaissent en surface, remplacées par des interstratifiés I-(10-14_M). Dans les deux cas cités, la kaolinite n'existe pas dans les roches-mères et apparaît dans les profils en quantité constante (30 %) de la base au sommet.

— *En milieu à drainage ralenti et à profil fersiallitique hydraté*, les minéraux argileux ne présentent aucune évolution, de la roche-mère au sommet du sol (L.386).

2.2.2. *Sols formés sur karst couvert* (chaîne de sols de Nabatyé).

L'unité pédogénétique n'est plus ici la roche karstique, mais un ensemble comprenant plateau, pente et bas-fond (chaîne de sols). L'évolution des sols amont influe sur celle des sols aval : ainsi, l'érosion a découpé les horizons de surface du haut de la chaîne au profit des sols du bas de pente surtout sableux, alors que les éléments fins ont été transportés beaucoup plus loin.

Le profil minéralogique ne traduit qu'assez peu les lents remaniements, si ce n'est par la présence d'illite en bas de pente (453-4) et une certaine constance des taux d'un même minéral argileux dans les profils. Il faut cependant noter que cette faible évolution est également liée aux précipitations peu élevées (800 mm) et les interstratifiés illite-montmorillonite sont le stade ultime de l'évolution des minéraux argileux. Le ralentissement du drainage, traduit à l'observation par la présence de marbrures brunes, entraîne un début de confinement avec apparition de minéraux gonflants de type montmorillonite. Ce phénomène se produit au milieu de la pente (en 449 et 451) et après la rupture de pente en 454.

2.2.3. *Autres types de sols*

— Sur les calcaires tendres de l'Eocène, les minéraux argileux des sols bruns calcaires sont formés par une montmorillonite bien cristallisée se dégradant légèrement en surface.

— Sur roche et sur tuf basaltiques des régions subhumides du Nord et du Sud du Liban, les minéraux argileux des sols bruns peu évolués sont également formés de montmorillonite, de la roche-mère au sommet du profil.

2.3. **Dans les régions subhumides à semi-arides des piedmonts de de la Bekaa**

La haute plaine intérieure de la Bekaa, relativement bien arrosée dans le Sud (700 mm), passe progressivement à des conditions d'aridité dans le Nord (200 mm). Les sols de piedmont formés sur colluvions sont fréquemment de type fersiallitique, parfois calcaires et souvent recalcarifiés, surtout quand les précipitations sont inférieures à 400 mm.

2.3.1. *Piedmonts subhumides de la Bekaa*

Malgré les précipitations de 600-700 mm, ces régions intérieures sont soumises à de fortes évapotranspirations pendant 6 mois de l'année. Des sols fersiallitiques saturés sont abondants sur les glacis et cônes de déjection des piedmonts du Liban et de l'Anti-Liban.

conglomérats de pente.

Sols non calcaires

Au Sud de la Bekaa, faisant transition avec les plateaux du Sud-Ouest, les minéraux argileux des profils (L.103 - Karaoun) évoluent modérément vers les interstratifiés I-(10-14_M)-M.

Plus au Nord et sur les piedmonts plus arides de l'Anti-Liban, une chaîne de sols a été étudiée à Kfar Zabad (fig. 2).

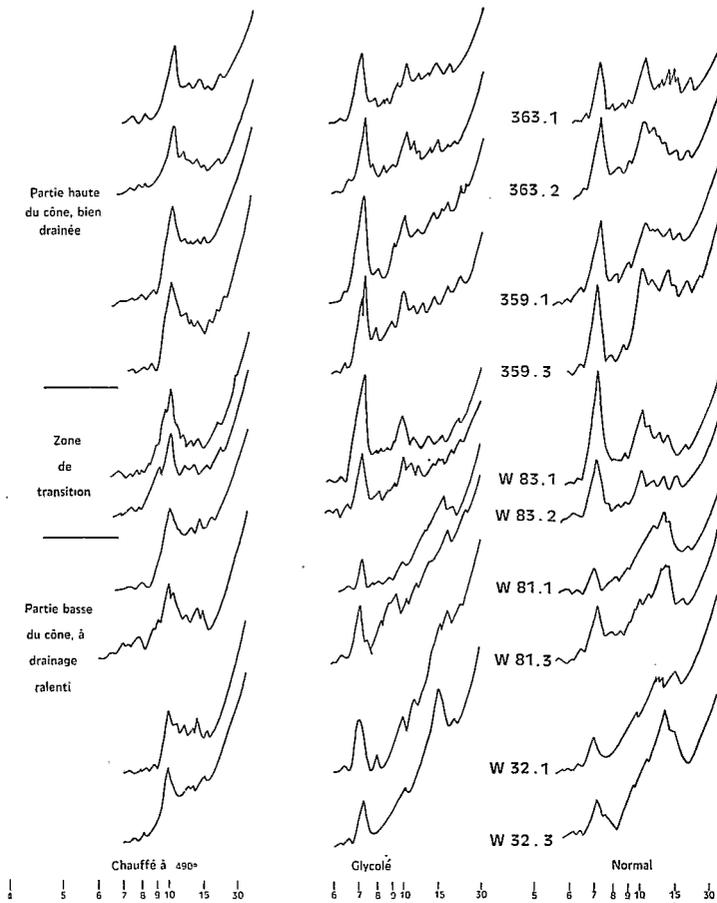


Fig. 2

Evolution des minéraux argileux dans les sols de la chaîne de Kfar-Zabad.

Les sols de la partie supérieure de la chaîne sont bien drainés (pente de 10 %, conglomérats en substrat). L'évolution des minéraux argileux y est peu marquée de la base au sommet des profils (363 à W.83). Ce sont des interstratifiés (14_C-14_M) ou I-(10-14_M)-M avec une forte proportion d'illite ouverte. Dans la zone de transition, les minéraux argileux traduisent une évolution un peu plus poussée vers la montmorillonite (10-14_M)-M.

La partie inférieure de la chaîne fait déjà partie de la plaine de la Bekaa dont les sols sont mal drainés et plus ou moins recalcarifiés. Dans ce milieu confiné hydromorphe, les teneurs en montmorillonite sont élevées, tandis que les taux de kaolinite et d'illite sont relativement faibles.

Sols calcaires

Les sols formés en piedmont sur les colluvions calcaires ou sur les conglomérats pliocènes restent fortement calcaires et traduisent souvent une évolution peu marquée. Le profil minéralogique d'une toposéquence formée de 15 profils, présente des taux uniformes de montmorillonite (90 à 100 %) de la roche au sommet du profil. Il en est de même pour tous les profils calcaires étudiés de cette région.

2.3.2. Piedmonts semi-arides de la Bekaa

Une chaîne de sols fersiallitiques étudiée à Kfardane, sous un climat semi-aride (400 mm), nous a permis d'observer l'évolution des minéraux argileux des sols d'une partie haute bien drainée et ceux d'une partie basse à drainage ralenti.

Dans la partie supérieure de la chaîne (395 et 394), les minéraux de type chlorite ont disparu, l'illite et la kaolinite se maintiennent mais en quantité relativement plus faible, tandis que la montmorillonite domine nettement.

2.4. En régions semi-arides à arides du Nord de la Bekaa

A titre comparatif, quelques profils ont été prélevés sur des glacis d'accumulation du Nord de la haute plaine de la Bekaa (prélèvements P. Willaime).

Dans un sol brun isohumique situé au Nord de Baalbek, sous 350 mm de précipitations, de la montmorillonite en forte dominance (70 à 80 %) apparaît dans tout le profil, ainsi que dans la croûte calcaire.

Une toposéquence a été effectuée sur un glacis d'accumulation près de la frontière syrienne, sous 200 mm de précipitations. Les

sols bruns sont remaniés en surface (action éolienne), ils sont limoneux et présentent une croûte ou un encroûtement calcaire entre 40 et 80 centimètres ou sur le conglomérat calcaire quand celui-ci sert de substrat (VERHEYE, 1970). Ce même auteur signale dans ces sols des taux de magnésium échangeable, parfois supérieurs à ceux de calcium, ainsi que des cristaux de gypse situés en profondeur.

Dans le profil situé le plus haut (418), l'encroûtement est constitué d'éléments détritiques et le conglomérat n'est pas encore visible en profondeur. L'attapulгите n'existe pas en surface, mais des taux de 20 à 30 % apparaissent dans le reste du profil riche en nodules et en éléments détritiques calcaires plus ou moins encroûtés. Dans le profil suivant (W.9), les taux d'attapulгите sont élevés (60 %) dans l'encroûtement calcaire, mais le sont moins dans le reste du profil (20 à 30 %).

Dans le glaci inférieur, sur une pente plus faible (W.7), l'attapulгите est très abondante dans la croûte (70 %) et reste abondante dans les horizons situés sur et sous la croûte. Enfin, dans le dernier profil (W.10), formé sur alluvions récentes, l'attapulгите n'apparaît qu'en profondeur, associée à de la montmorillonite.

3. MECANISMES DE L'EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX

D'après l'étude détaillée de la fraction argileuse, dans les sols caractéristiques du Liban, on peut tenter de mettre en évidence les grands mécanismes qui règlent l'évolution des minéraux argileux.

3.1. Héritage

La plupart des roches-mères des sols du Liban sont sédimentaires et contiennent des minéraux argileux. Ces minéraux sont libérés par la dissolution des roches et vont constituer la majeure partie du sol. Il s'agit là d'un héritage. Cet héritage intéresse différents minéraux argileux.

— *Kaolinite*. Plusieurs cas sont possibles. Ou bien, dans le cas du profil L.404, la kaolinite provient des roches-mères et se maintient dans le sol, atteint d'une pédogenèse de faible intensité : l'héritage est évident. Ou bien, comme dans le cas des profils L.315 ou L.248, la kaolinite, héritée de la roche-mère, augmente en valeur relative, en raison de la dégradation préférentielle des autres minéraux : nous sommes devant une accumulation relative de kaolinite héritée. Ou bien, comme dans le cas des profils L.342, L.319 et L.373, la kaolinite est bien représentée dans le sol, en n'étant présente qu'à l'état de traces dans la roche-mère sous-jacente; on doit cependant

envisager les pollutions latérales et surtout l'accumulation de kaolinite venant de bancs qui en contenaient et qui ont été dissous par altération superficielle.

Dans tous ces cas, les conditions de milieu ne permettent pas de faire appel à une néoformation de kaolinite. Il est plus raisonnable, pour expliquer la présence de ce minéral, d'invoquer le phénomène plus discret de l'héritage.

— *Montmorillonite*. Quand la montmorillonite est présente dans la roche-mère ou dans la zone d'altération de la roche-mère, elle se maintient dans le profil, mais subit une nette dégradation en surface. C'est ce que l'on observe dans le profil L.343 sur calcaire dur ou dans le profil L.414 sur tuf basaltique.

— *Illite*. Seules les régions semi-arides sont favorables à la conservation de l'illite et de ses interstratifiés. Dans la plupart des cas, l'illite et les édifices micacés se transforment.

3.2. Transformations

Les transformations, définies par MILLOT (1964) comme des « changements qui modifient un minéral argileux avec maintien de son type de structure », intéressent en effet essentiellement les édifices micacés, en particulier l'illite.

L'illite, fournie par les roches-mères, est en général une illite ouverte, donc déjà légèrement altérée. La transformation de l'illite dans les sols se poursuit selon deux voies.

3.2.1. L'illite se transforme en vermiculite dans les sols bien drainés et évolués des régions montagneuses arrosées, c'est-à-dire quand la pluviosité moyenne annuelle dépasse 1000 mm.

L'illite donne naissance à la vermiculite par l'intermédiaire d'interstratifiés illite-vermiculite. Ce mécanisme est une dégradation qui a souvent été décrite en climat tempéré (JACKSON, 1965; CAMEZ, 1962; MILLOT, LUCAS & PAQUET, 1965; GJEMS, 1960; GAC, 1968; TARDY, 1969). Cette dégradation est discrète et prend place dans un milieu où les hydrolyses sont ménagées.

La vermiculitisation des illites est plus ou moins progressive. Dans les profils peu épais et jeunes, comme par exemple le profil L.404, elle ne parvient pas à son terme; elle s'arrête au stade des interstratifiés I-(10-14_v)-V. Dans les profils développés sur grès, comme le profil L.424, le milieu, bien drainé, favorise l'hydrolyse et on assiste à une nette individualisation de vermiculite dans les horizons superficiels. Dans les profils développés sur roches carbonatées, comme les profils L.315 ou L.342, la transformation est un peu moins complète: en surface subsiste un mélange vermiculite, interstratifiés qui traduit un lessivage plus faible que sur grès.

En conclusion, l'illite et, plus généralement, les édifices micacés se dégradent en vermiculite sous des précipitations supérieures à 1000 mm, et cela d'autant plus que le milieu est mieux drainé et que le profil est plus évolué.

3.2.2. L'illite se transforme en édifices gonflants et en montmorillonite dans les sols sur calcaire soumis à des pluviosités moyennes annuelles inférieures à 1000 mm et dans les sols rouges de piedmont, du haut vers le bas des glacis.

La transformation de l'illite en direction de la montmorillonite se réalise par un mécanisme qui a été proposé par TARDY (1969). Le mécanisme consisterait en un lessivage progressif des ions alcalins et alcalino-terreux et un enrichissement relatif du feuillet en silicium. Des analyses d'eaux effectuées par LAMOUREUX, THIEBAUD & SAHYOUNI (1968) montrent que les ions alcalins et alcalino-terreux sont beaucoup plus entraînés que le silicium. Dans ce cas, la montmorillonitisation de l'illite et, plus généralement des édifices micacés, caractérisent les milieux considérés comme lessivants vis-à-vis des alcalins et alcalino-terreux, et confinants vis-à-vis de la silice.

En montagne, les sols bruns hydratés, tels que les profils L.248 et L.344 qui constituent des milieux à drainage ralenti, présentent cette transformation des édifices micacés en montmorillonite.

En zone de plateau, la montmorillonitisation ne parvient pas à son terme. C'est ce que l'on observe dans les profils L.319 et L.373, où l'évolution des édifices micacés s'arrête au stade des interstratifiés gonflants I-(10-14_M).

Les chaînes de sols de piedmont de Kfar-Zabad et de Kfardane donnent un très bel exemple de montmorillonitisation des édifices micacés. Néanmoins, les fortes teneurs en montmorillonite observées dans presque tous les sols de bas de pente ne peuvent être expliquées par le seul mécanisme de la transformation des édifices micacés.

En conclusion, l'illite et, plus généralement, les édifices micacés se transforment en montmorillonite sous des précipitations inférieures à 1000 mm, quand le milieu est confinant vis-à-vis de la silice, c'est-à-dire dans les poches ou les sols bruns hydratés pour les profils des régions montagneuses, et en bas de pente, dès que le drainage se ralentit. Cette transformation peut se poursuivre dans des milieux plus confinants, mais un nouveau mécanisme apparaît alors, celui des néoformations.

Parfois cependant, des sols très calcaires se développent sur des

3.3. Néoformations

Dans les sols du Liban, on peut mettre en évidence la néoformation de trois types de minéraux argileux.

— *Montmorillonite*. Lorsqu'on étudie la variation de la fraction argileuse des sols rouges de piedmont sur matériaux issus de roches carbonatées le long d'un glacier, on observe, en bas de chaîne, dans les sols situés dans la zone de battement de la nappe une très forte dominance de la montmorillonite dans la fraction argileuse. Ces sols sont caractérisés par un drainage interne très ralenti et des accumulations de calcaire pouvant aller jusqu'à la formation de croûtes et d'encroûtements. On peut donc penser qu'une néoformation prend place dans les zones confinées : cette montmorillonite viendrait s'ajouter à la montmorillonite issue de la transformation des édifices micacés le long des glaciers.

La néoformation de montmorillonite est également évidente dans les sols développés sur basalte ou tuf basaltique des régions subhumides. En effet, les basaltes et tufs basaltiques ne contiennent pas de montmorillonite et, si ce minéral argileux apparaît dans toute l'épaisseur des profils, il faut qu'il s'y soit néoformé. Ainsi la montmorillonite se néoforme au Liban dans les sols sur roche basaltique des régions subhumides et dans le milieu confiné hydromorphe que représentent les bas de chaînes dans la plaine de la Bekaa.

— *Attapulgite*. Dans les régions arides du Nord de la plaine de la Bekaa, sous 200 mm de précipitations moyennes annuelles, l'attapulgite apparaît dans les sols bruns à croûte et encroûtement. Cette attapulgite est particulièrement abondante au niveau de l'encroûtement et elle diminue en surface et en profondeur. Comme l'attapulgite n'a jamais été trouvée dans les roches sédimentaires des massifs avoisinants, et qu'elle apparaît nettement liée à la croûte ou à l'encroûtement du profil, sa néoformation au cours de la pédogenèse est très probable. Cette néoformation est assurée par la concentration des ions Si, Al, Mg des solutions du sol sous le climat aride (MILLOT, 1964; MILLOT *et al*, 1969).

— *Kaolinite*. Des néoformations de kaolinite ou d'édifices à 7 Å de la famille de la kaolinite peuvent être décrites dans des profils sur roche basaltique, comme par exemple le profil L.414, sous 1300 mm de précipitations. La néoformation de kaolinite est, dans ce cas, liée à une roche-mère facilement altérable et à un milieu acide (pH 5 à 6), très bien drainé pendant les mois de forte pluviosité.

3.4. Conclusions

Trois grands mécanismes règlent l'évolution des minéraux argi-

leux dans les sols du Liban : l'héritage, les transformations et les néoformations.

L'héritage représente un mécanisme fondamental; la fraction argileuse des sols mime celle des roches-mères dans un très grand nombre de cas; les minéraux argileux constituent la trame de fond sur laquelle vont jouer les deux autres mécanismes d'évolution.

Les transformations qui agissent essentiellement sur les édifices micacés conduisent, soit à la vermiculite, soit à la montmorillonite, selon les conditions de climat et de milieu. Elles représentent de cette façon un précieux indicateur de la pédogenèse.

Les néoformations apportent une couleur nouvelle à cette gamme dont chaque nuance a une signification précise : une hydromorphie prononcée, liée à une forte évapotranspiration mène à la montmorillonite; un confinement extrême des solutions, lié à des conditions arides, conduit à l'attapulгите.

4. MINÉRAUX ARGILEUX ET PEDOGENESE

4.1. Les grands domaines, les zones et les milieux de l'évolution des minéraux argileux du Liban

Deux grands domaines caractérisent les sols du Liban du point de vue minéralogique (fig. 3).

- 1) Le domaine des sols lixiviés et bien drainés.
- 2) Le domaine des sols confinés et plus ou moins bien drainés.

4.1.1. *Le domaine des sols lixiviés*

Ce domaine est représenté par tous les sols non calcaires des Monts-Liban et Anti-Liban. Il peut être subdivisé en 3 zones.

- 1) Une zone de montagnes (A) où les précipitations sont supérieures à 1000 mm, entraînant une hydrolyse modérée des minéraux argileux, mais suffisante pour masquer « l'héritage ».
- 2) Une zone de plateau (B) entre 600 et 1000 mm de précipitations. Les hydrolyses y sont faibles et les transformations réduites aux stades intermédiaires des interstratifiés, laissent apparaître « l'héritage ».
- 3) Une zone de piedmonts (C), en bordure de la Bekaa et sous 600 mm de précipitations. Les minéraux argileux ne subissent aucune transformation, « l'héritage » transporté des versants reste intact.

4.1.2. *Le domaine des sols confinés*

Trois types de milieux représentent les sols à mauvais drainage.

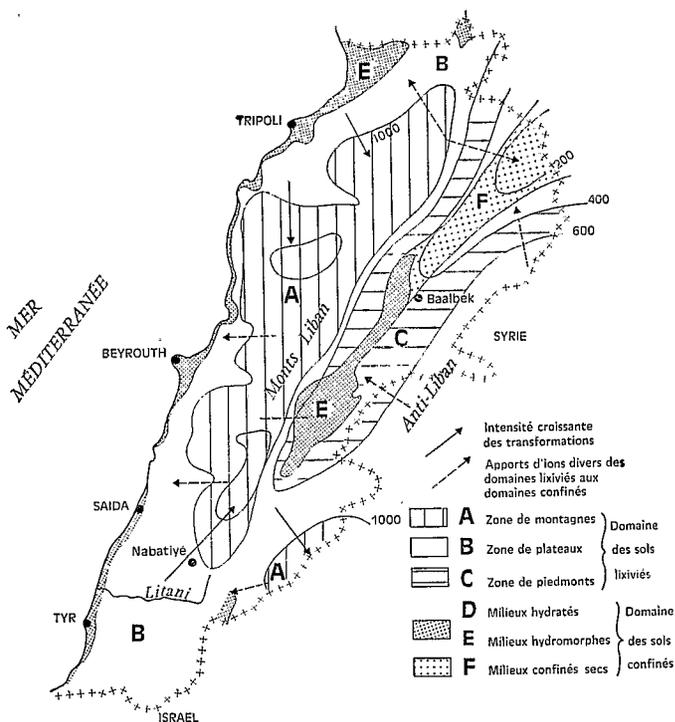


Fig. 3

Les grands domaines et les régions d'évolution des minéraux argileux au Liban.

1) Les milieux hydratés (D), caractérisent des sols du karst à drainage ralenti et parfois hydromorphes en profondeur. De nombreux sols sont partiellement hydratés et se répartissent ponctuellement dans le karst, surtout dans la région A et parfois dans la région B. Dans ces milieux, les minéraux argileux ont d'abord été plus ou moins transformés suivant la pluviosité du lieu, puis plus ou moins enrichis en silice quand le confinement est survenu.

2) Les milieux hydromorphes (E) existent un peu partout dans les sols de dolines, dans les talwegs, dans les sols de la plaine littorale et surtout dans ceux de la Bekaa centrale. Dans les sols hydromorphes de la Bekaa, les interstratifiés « se silicifient » pour donner de la montmorillonite.

3) Les milieux confinés des régions plus ou moins arides (F) sont limités aux sols alluviaux-colluviaux du Nord de la Bekaa. Ces sols sont calcaires et fortement encroûtés. Alors que la montmorillonite est seule présente dans les sols et les croûtes calcaires des régions semi-arides, un nouveau type d'argile, l'attapulгите, appa-

raît dans les encroûtements et dans les sols colluviaux-calcaires des régions arides.

4.2. Les minéraux argileux et les sols

Les minéraux argileux sont des constituants actifs du sol de par les multiples rôles aussi bien chimiques que physiques qu'ils peuvent jouer. Certains de ces rôles sont bien connus, comme l'adsorption sur le complexe absorbant ou la rétention de l'eau, d'autres le sont moins, comme la fixation des produits amorphes organiques ou minéraux, ou l'arrachement et la dissolution de la pellicule d'altération des roches carbonatées (LAMOUROUX, 1971).

Il en est d'autres enfin qu'il nous paraît intéressant de mettre en évidence dans le cadre de cette note.

4.2.1. Gonflement et retrait des minéraux argileux dans les sols fersiallitiques

Bien que ne présentant pas souvent de fentes de retrait en surface, les sols rouges fersiallitiques, riches en montmorillonite, subissent des alternances d'humectation et de dessiccation provoquant des contraintes considérables et des mouvements de masse dans les horizons profonds. La résultante de ces forces se traduit entre autres :

— par l'apparition de structures caractéristiques, microagrégats polyédriques à angles aigus dans les petites poches ou les sols peu épais. Ces polyèdres sont feuilletés et aplatis, quand le sol est riche en minéraux montmorillonitiques, et semblent plus globuleux quand les taux de kaolinite augmentent. Dans les poches plus larges ou en bas de pente, les microagrégats polyédriques se soudent en une macrostructure large, prismatico-cubique. Si les contraintes (poids du sol, goulet rocheux) sont élevées, cette macrostructure prend la forme de plaquettes conchoïdales caractéristiques de sols vertiques;

— par un lissage des surfaces de glissement entre agrégats ou agrégats contre éléments du squelette. Bien que se distinguant assez difficilement, au microscope polarisant, de cutanes d'illuviation, ces domaines biréfringents ont des racines avec le plasma beaucoup plus hachées et moins nettes que celles des cutanes. Ces domaines existent dans toute la masse des horizons profonds, ils sont très nombreux, fragmentés (assemblage asépique), parfois organisés (assemblages lattisépique);

— par une diminution de la porosité se traduisant, dans certains cas, par un drainage défectueux avec apparition d'horizons ou de marbrures brun-jaune, caractéristiques du milieu confiné hydraté.

4.2.2. *Minéraux argileux et paléosols*

Les minéraux argileux peuvent être des indicateurs de paléoclimats ou d'anciennes conditions de pédogenèse, si les sols ont pu être protégés de l'action des climats ou de milieux plus récents et plus agressifs.

a) Des sols rouges pincés entre deux coulées basaltiques du Pliocène indiquent par leur pourcentage de kaolinite (40 %) des conditions climatiques plus agressives (500 mm de plus environ) que les conditions actuelles.

b) Les minéraux argileux piégés dans les conglomérats pliocènes sont très riches en montmorillonite et de couleur rouge. Les matériaux transportés en bas de pente étaient issus de sols rouges du karst amont dont les conditions de pédogenèse n'étaient pas sensiblement différentes de celles observées aujourd'hui, si ce n'est plus pluvieuses. Le piégeage dans le conglomérat s'est effectué sur les cônes ou les glacis à la suite d'une aridification du climat.

c) Les nodules calcaires et les croûtes ou encroûtements piègent des matériaux qui reflètent des conditions de milieu antérieures à celles de l'accumulation calcaire. Ainsi dans le profil L.248, les nodules présentent 80 % de kaolinite, alors que le milieu environnant n'en a que 60 % et la roche-mère 30 %. Nous pouvons supposer qu'au cours d'une première phase rubéfiante, une forte kaolinisation a marqué le sol comme en témoignent les 80 % de kaolinite des résidus des nodules. Au cours d'une deuxième phase, moins agressive, des nodules se sont formés et une partie de la kaolinite a été entraînée du profil comme cela se produit actuellement. L'histoire complexe des sols bruns hydratés (LAMOUROUX, 1971), semble donc s'inscrire dans les accumulations calcaires de ces profils.

d) Le profil minéralogique des sols lixiviés des piedmonts de la Bekaa présente une variété de minéraux assez grande et non ordonnée, témoignant d'une mise en place fractionnée et d'une absence d'évolution des matériaux. Depuis la mi-Quaternaire, les précipitations n'ont jamais été suffisantes pour provoquer des hydrolyses même modérées.

4.2.3. *Minéraux argileux et différenciation des sols*

Le profil minéralogique constitue un excellent critère de différenciation des sols. Un entraînement préférentiel des éléments fins fait apparaître un horizon de surface éluvial et parfois un horizon profond illuvial; l'hydrolyse des minéraux montmorillonitiques provoque un appauvrissement des horizons de surface. Il faut cependant interpréter avec prudence un gradient d'argile qui peut être provo-

qué par la formation d'agglomérats d'éléments fins ou pseudo-particules.

Nous avons vu, dans la première partie de cette note, que des variations quantitatives peuvent introduire des différenciations importantes marquées par la structure, la couleur, etc. Enfin, l'absence d'évolution des minéraux argileux, au-dessous de 600 mm, est un important critère de la faible évolution des sols considérés.

5. CONCLUSIONS

La dynamique de l'évolution des minéraux argileux des sols du Liban est souvent verticale, parfois oblique quand il s'agit de dégradation. Elle est toujours oblique, quand il s'agit de transformations par enrichissement en silice ou de néoformations. Les sources d'ions ayant pour origine l'hydrolyse des minéraux argileux de surface et les dissolutions de carbonates des bassins versants amont, nous pouvons dire (PAQUET, 1969) que l'amont nourrit l'aval. D'une façon générale, l'évolution se fait vers la montmorillonite. La montmorillonite envahit le paysage, domine les milieux plus ou moins bien drainés des montagnes et engorge les bas-fonds et les plaines (LAMOUREUX, 1971).

Nous avons vu, par ailleurs, combien étaient sensibles les minéraux argileux des sols du Liban comme indicateurs de l'homogénéité ou de l'origine des matériaux, des paléo-climats, des différents milieux de pédogenèse. Le profil minéralogique constitue un excellent critère de l'évolution d'un sol et intervient à un très haut niveau dans la classification des sols.

Les argiles des sols des régions méditerranéennes peuvent donc être particulièrement variées et sensibles, contrairement à certaines opinions anciennes. En outre, leur évolution se situe entre les évolutions très poussées des minéraux argileux des sols des régions tropicales et les évolutions plus discrètes des minéraux argileux des sols des régions tempérées.

*
**

BIBLIOGRAPHIE

Camez T. (1962)

Etude sur l'évolution des minéraux argileux dans les sols des régions tempérées.

Mém. Serv. Carte. Géol. Als. Lorr., 20, 90 p.

Commission de pédologie et de cartographie des sols (1967)

Classification des sols. Labo. Pédol. Géol. E.N.S.A. Grignon, multigr. 87 p.

Gac J.Y. (1968)

Les altérations de quelques roches cristallines des Vosges. Etude minéralogique et géochimique. Thèse de 3^e cycle Strasbourg, 77 p.

- Gjems O.** (1960)
Some notes on clay minerals in podzol profiles in Fennoscandia.
Clay Min. Bull., 4, p. 208-211.
- Jackson M.L.** (1965)
Clay transformation in soil genesis during the Quaternary.
Soil Sci., 99, p. 15-22.
- Lamouroux M., Paquet H., Pinta M. & Millot G.** (1967)
Notes préliminaires sur les minéraux argileux des altérations et des sols méditerranéens du Liban.
Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 20,4, p. 277-292.
- Lamouroux M.** (1968)
Les sols bruns méditerranéens et les sols rouges partiellement brunifiés du Liban.
Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., 6, p. 63-93.
- Lamouroux M., Thiebaud M. & Sahyouni M.** (1968)
Roches carbonatées et eaux du Liban.
MAGON, *Inst. Rech. Agron. Liban*, Publ. 22 (Série Sci.), 29 p.
- Lamouroux M.** (1971)
Etudes de sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. Thèse Sci. Strasbourg.
Mém. O.R.S.T.O.M., 56, 266 p.
- Lucas J.** (1962)
La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du Trias.
Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 23, 202 p.
- Millot G.** (1964)
Géologie des argiles. MASSON et Cie Ed., Paris, 499 p.
- Millot G., Lucas J. & Paquet H.** (1965)
Evolution géochimique par dégradation et aggradation des minéraux argileux dans l'hydrosphère.
Geol. Rundschau, 55, p. 1-20.
- Millot G., Paquet H. & Ruellan A.** (1969)
Néoformation de l'attapulgit dans les sols à carapaces calcaires de la Basse Moulouya (Maroc oriental).
C. R. Acad. Sci. Paris, 268-D, p. 2771-2774.
- Paquet H.** (1969)
Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. Thèse Sci., Strasbourg.
Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 30, 1970, 210 p.
- Tardy Y. & Gac J.Y.** (1968)
Minéraux argileux dans quelques sols et arènes des Vosges cristallines. Présence de vermiculite-A1. Hypothèse de la néoformation des vermiculites et montmorillonites.
Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 21, 4, p. 285-304.
- Tardy Y.** (1969)
Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Sci. Strasbourg.
Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 31, 199 p.
- Verheye W.** (1968)
Study of a toposequence under arid climatic conditions in Lebanon.
Pédologie, XVIII, 2, Gand, p. 253-262.

Résumé

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 pédogenèse.

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'attapulгите 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.

Evolution of clay minerals in the soils of Libanon

Summary

The evolution of clay minerals has been studied throughout profiles and along catenas. This evolution is related to mean annual rainfall and to pedogenetic environments.

The mechanisms of the evolution of clay minerals are the three following : — heredity contributes for a great part to the clay mineralogy of the soils of Lebanon. In numerous soils developed on sandstones and carbonated rocks, clay minerals are similar to rock's ones or partially transformed by moderate hydrolyses;

— transformations resulting from these hydrolyses especially mark the illitic minerals evolving toward mixed layers, vermiculite and montmorillonite;

— neoformations could be pointed out in the hydromorphic soils of lowlands where a strong confinement leads to montmorillonite in subhumid to semi-arid climate and to attapulгите in arid climate.

In spite of the importance of heredity, clay minerals and especially illite are very sensitive to climatic variations and constitute an excellent indicator of the evolution of soils. They permit us to identify the origin and homogeneity of a material. Their stage of evolution is one of the main characteristics of fersiallitic soils.

Evolutie van kleimineralen in de bodems van Libanon

Samenvatting

De evolutie van de kleimineralen in de profielen en in de catenas blijkt in verband te staan met de neerslag en het pedogenetisch midden.

Drie evolutietypen komen voor :

- overgeërfd uit het moedergesteente,
- omzettingen ingevolge hydrolyse, vooral illiet is hierbij betrokken en wordt omgezet tot geïnterstratificeerde mineralen, vermiculiet en montmorilloniet,
- neoformatie, vooral in hydromorfe voorwaarden aan de voet van de heuvels; sterk in basen en silica geconcentreerd bodemwater begunstigt er de vorming van montmorilloniet onder subvochtig en semi-aried klimaat, van attapulgit onder aried klimaat.

Niettegenstaande het belang van de overerving zijn de kleimineralen, en vooral het illiet, zeer gevoelig aan klimatologische variaties. Ze zijn derhalve een goede aanwijzing bij de bepaling van het fersiallitisch evolutietype.

Entwicklung der Tonminerale in den Böden Libanons

Zusammenfassung

Die Entwicklung der Tonminerale in den Profilen und in den Katenen scheint im Zusammenhang zu stehen mit dem Regenniederschlag und mit dem pedogenetischen Milieu.

Drei Evolutionsformen kommen vor :

- vererbt aus dem Muttergestein,
- Umwandlungen infolge Hydrolyse, vor allem wird Illit hierbei betroffen und wird umgewandelt bis zu zwischengelagerten Mineralen : Vermiculit und Montmorillonit,
- Neubildung, vor allem unter hydromorphen Verhältnissen am Hangfuß; an Basen und Silikaten stark angereichertes Bodenwasser begünstigt die Bildung von Montmorillonit unter subfeuchtem und semi-aridem Klima, von Attapulgit unter aridem Klima.

Ungeachtet der Bedeutung der Vererbung sind die Tonminerale, und besonders Illit, sehr empfindlich gegen Klimaänderungen. Deshalb geben sie gute Hinweise bei der Feststellung der fersiallitischen Entwicklungsform.
