

Formation des amas friables et des nodules calcaires dans des sols argileux en régions tempérée et semi-aride

M. KAEMMERER (*)

J.-C. REVEL (*)

J.-F. BARLIER (*)

RÉSUMÉ

En région tempérée, les accumulations calcaires sont initiées par un pseudomycélium micritique sur les parois des pores tubulaires dans les vides structuraux du matériau hôte. Les anastomoses des pseudomycéliums dans les fissures où passent préférentiellement les radicelles, puis les débordements de la calcite dans le fond matriciel, qui est alors épigénisé, conduisent aux amas friables et enfin, par induration aux nodules. RUELLAN (1971) avait déjà observé cette filiation dans le nord-est du Maroc. La précipitation de calcite est alors sous la dépendance directe de l'absorption racinaire.

Au Maroc encore, mais sous des climats plus secs, les amas friables et les nodules apparaissent dans les milieux argileux structurés. Il se forme d'abord une couronne de microsparite autour des agrégats, puis la micrite épigénise les silicates argileux ; apparemment, dans ce cas pour le moins, c'est l'évaporation directe qui concentre les solutions et provoque la précipitation de la calcite, et non pas l'absorption racinaire. Les pseudomycéliums, sous la dépendance de la végétation, sont présents, mais dans un horizon distinct, toujours sus-jacent à celui contenant les amas friables et les nodules. Au cours d'un cycle annuel, la calcite des pseudomycéliums paraît précipiter avant celle des amas friables. Il y a disjonction spatiotemporelle entre pseudomycéliums et amas friables.

Malgré les convergences de formes macroscopiques, les microstructures permettent de différencier deux processus à l'origine des amas friables et des nodules.

MOTS-CLÉS : amas friable - nodule - sol argileux - climat tempéré - climat semi-aride - sol calcaire - croûte calcaire - Maroc.

CALCAREOUS CRUMBLY MASS AND NODULE FORMATION IN SOME CLAYEY SOILS IN TEMPERATE AND SEMI-ARID AREAS

In temperate climates (the Terrefort toulousain, Fig. 1 & 2), in clayey soils (Fig. 3, Tabl. I), calcareous accumulations are initiated by micritic pseudomycelia on the walls of tubular pores (Photo 1) in the structural voids of the parent materials. Anastomizing of pseudomycelia (Photo 2) in craze planes where roots are chiefly present, combined with calcite invading the S.matrix by epigenesis (Photo 3), results in crumbly masses, and finally hardening in nodules. RUELLAN (1971) had already observed this process in North-Eastern Morocco. Calcite precipitation is then directly dependent on root absorption.

Again in Morocco, but in drier climates (Fig. 1 & 2), in clayey or claysilted soils (Fig. 3, Tabl. I), crumbly masses and nodules appear in well structured sets. A micromorpholo-

(*) Laboratoire de Pédologie et de Fertilisation, ENSA-INPT
145, avenue de Muret, 31076 Toulouse Cédex.

gical study shows that crumbly masses are formed with microsparite inside the craze planes and around the masses and with a micritic mass including *S.matrix* islets (Photos 4 & 5) inside ; nodules show no islets (Photo 6). The arrangement of those different microstructures suggests that, first, a halo of microsparite is beginning to form around the aggregates (Photo 5), then micrite invades the claysilicates, by epigenesis ; apparently, in that case at least, direct evaporation, rather than root absorption, concentrates solutions and precipitates calcite. Pseudomycelia, in relation to vegetation, are present in a distinct horizon which always lies above the layer which contains the crumbly masses and the nodules. During an annual cycle, pseudomycelia calcite precipitates earlier than that of the crumbly masses : there is a spatio-temporal disjunction between pseudomycelia and crumbly masses.

In spite of the convergence of their macroscopic forms, their microstructures make it possible to differentiate the two processes that are at the origin of crumbly masses and nodules.

KEY-WORDS : crumbly mass - nodule - clayey soil - temperate climate - semi-arid climate - calcareous soil - calcrete - Morocco.

INTRODUCTION

Les accumulations calcaires dans les sols peuvent se développer sous les climats les plus variés, depuis les régions très froides où la précipitation des carbonates pourrait être due au gel, ainsi que le discute récemment VAN VLIET-LANOE (1988), jusqu'aux régions les plus sèches et chaudes, comme le montrent FEDOROFF et COURTY (1989). Depuis une vingtaine d'années, à partir de la mise au point de RUELLAN (1967, 1971), les travaux des pédologues sur ce sujet se sont intensifiés. En sont la preuve les colloques de Strasbourg (1975 : Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale), de Bordeaux (1980 : Cristallisation, déformation et dissolution des carbonates), et de nombreux autres travaux importants parmi lesquels on peut citer ceux de NAHON (1976) au Sénégal et en Mauritanie, NAHON *et al.* (1977), RUELLAN *et al.* (1977) en région semi-aride à aride, DURAND (1978) en Champagne, JAILLARD (1980, 1987), JAILLARD et CALLOT (1987) en région subméditerranéenne, POUGET (1980) dans le Sud algérien, MOREAU (1981) au Maroc, VERGES (1982) en zone montagnarde, BUTEL (1982) sous climat atlantique, VOGT (1983) sous climat méditerranéen, BOCK (1984) en Algérie.

La plupart de ces travaux concernent les différentes formes d'accumulation dans une région donnée. Mais le même type d'accumulation peut apparaître dans diverses régions. Ainsi, les amas friables et les nodules se rencontrent depuis les zones tempérées d'Europe jusqu'aux régions arides d'Afrique du Nord et du Sénégal, dans des sols de texture fine. Il se forme donc, sous des climats très variés, des accumulations calcaires apparemment semblables.

En utilisant des profils contenus dans des séquences de sols étudiées par ailleurs dans deux zones distinctes, le Terrefort toulousain tempéré (REVEL, 1982 ; REVEL et BOURGEAT, 1985) et le bassin semi-aride du Sébou à proximité de Fès (KAEMMERER, 1987), on se propose de comparer les modes de formation des amas et des nodules calcaires. Afin d'éviter l'incidence d'un facteur supplémentaire, les sols présentés sont de texture voisine.

I. LES AMAS FRIABLES ET LES NODULES DANS LE TERREFORT TOULOUSAIN

L'exemple choisi est un sol brun lessivé situé sur une faible pente reliant une crête sommitale à un large plateau, dans la commune d'Esperce, à 45 km au sud de Toulouse (43° 17' 25" N, 1° 24' 50" W) (Fig. 1).

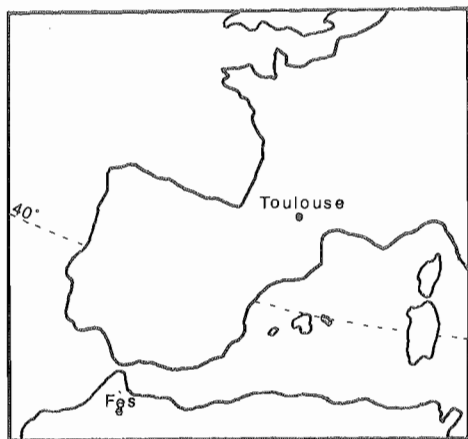


Figure 1 :
Situation géographique de
Toulouse et Fès.
*Geographical position of
Toulouse and Fès.*

Le climat est de type aquitain. La pluviosité moyenne annuelle est de 660 mm et la température moyenne annuelle de 12,7°C. Le diagramme ombrothermique de Gausсен ne montre pas de déficit hydrique (Fig. 2).

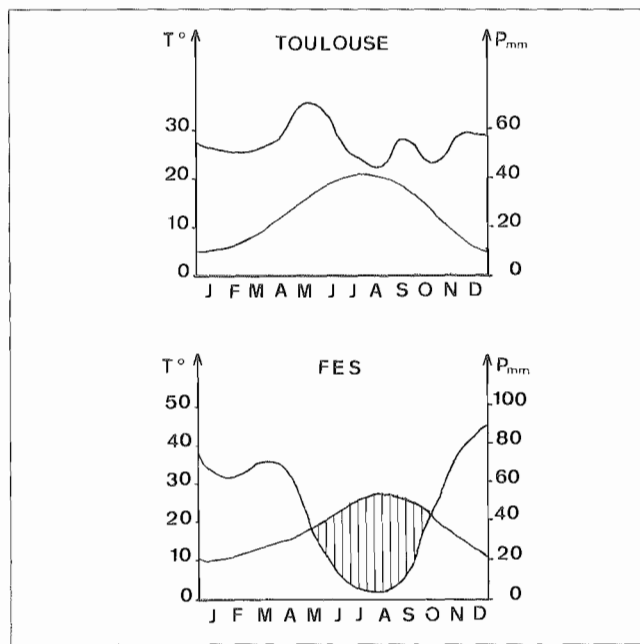


Figure 2 :
Diagrammes ombrothermiques, cas des villes de
Toulouse et de Fès.
*Ombrothermal diagram of
Toulouse and Fès.*

A) DESCRIPTION

Le profil présenté (Fig. 3A - Tabl. I) est un sol brun lessivé développé sur marne. Il a été étudié lors de travaux plus complets concernant une séquence (REVEL, 1982).

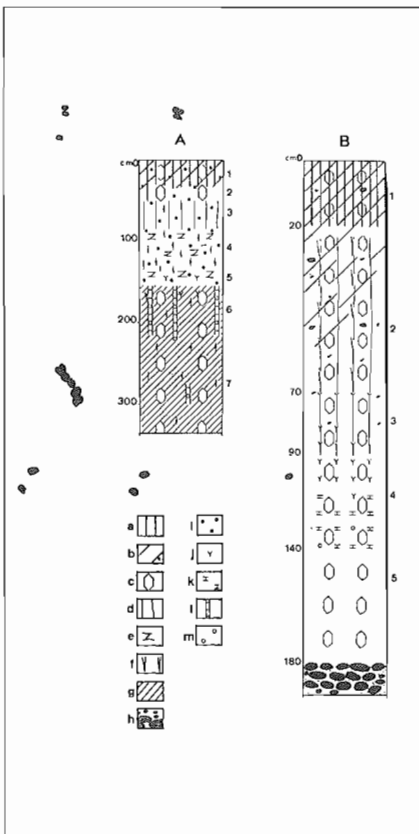


Figure 3 :

- (A) Sol brun lessivé du Terrefort toulousain.
 (B) Sol brun calcaire isohumique du bassin de Sébou.

- (a) : horizon perturbé
 (b) : matière organique
 (c) : structure subanguleuse
 (d) : structure prismatique
 (e) : structure verticale
 (f) : fente de retrait
 (g) : molasse
 (h) : galets et graviers
 (i) : plomb de chasse
 (j) : pseudomycélium
 (k) : amas friable
 (l) : amas friable vertical
 (m) : nodule

- (A) *Leached brown soil of the "Terrefort toulousain"*
 (B) *Isohumic calcareous brown soil of the Sébou basin.*

- (a) : horizon perturbé
 (b) : organic matter
 (c) : subangular structure
 (d) : prismatic structure
 (e) : vertic structure
 (f) : retraction crack
 (g) : molasse
 (h) : pebbles and gravel
 (i) : lead shot
 (j) : pseudomycelia
 (k) : crumbly masses
 (l) : vertical crumbly masses
 (m) : nodule

Sous un horizon perturbé argilo-limoneux se développe un horizon A2 (E) épais jusqu'à 85 cm de profondeur. En-dessous, entre 85 et 135 cm, se trouve un horizon très argileux (55% d'argiles à dominante de smectites très fines d'un diamètre inférieur à 0,2 μm) ; la structure en plaquette, les nombreuses faces de glissement et la couleur en font un horizon à caractère verticale et à pseudogley. Enfin, entre 135 et 155 cm, les accumulations calcaires sont nombreuses sous forme de pseudomycélium, amas friables et même nodules au centre des plus gros amas friables. Plus profondément, les accumulations calcaires diminuent progressivement en nombre et elles forment des amas friables allongés verticalement suivant les fissures de la structure prismatique.

L'examen à la loupe binoculaire et l'étude micromorphologique de l'horizon d'accumulation montrent des pseudomycéliums formant une couronne micritique autour des pores tubulaires localisés dans les fissures entre les prismes de la structure (Photo 1). Ces pseudomycéliums deviennent coalescents et constituent de fines accumulations à la surface des prismes (Photo 2). Ensuite, la micrite déborde dans le fond matriciel et on

peut voir inclus dans cette micrite des grains de quartz ainsi que des plages plasmiques (Photo 3). Les contours dentelés des grains du squelette ainsi que l'extinction simultanée de grains voisins à contours emboîtables sont la preuve de leur épigénie par la calcite (NAHON, 1976 ; NAHON *et al.*, 1977 ; RUELLAN *et al.*, 1977). Dans ces masses de micrite généralement pulvérulente s'individualisent parfois des nodules, mais il est impossible de discerner, notamment en lame mince, les zones indurées de celles qui ne le sont pas. L'accumulation du calcaire a précédé les mouvements des argiles qui parfois viennent se déposer en argilane sur le calcitane (Photo 3).

Tableau I : Données analytiques des sols étudiés, en % de la terre fine.
Analytical data of studied soils.

	A	L	S	CaCO ₃	pH	MO
1	29	49	22	0	6,8	1,04
2	32	46	22	0	7,5	0,6
3	38	42	22	0	7,8	0,5
4	50	34	20	0	7,9	0,3
5	47	38	16	trace	8,0	0,3
6	36	41	23	23	8,4	0,2
7	34	43	23	20	8,4	0,1

* Sol brun lessivé du Terrefort toulousain (Fig. 3A)
* Leached brown soil of the "Terrefort toulousain"

	A	L	S	CaCO ₃	pH	MO
1	35	44	21	19	8,1	1,1
2	42	49	9	19	8,0	0,8
3	48	41	11	26	8,0	0,7
4	41	45	12	42	8,3	0,5
5	42	47	11	38	8,3	-

* Sol brun calcaire de la région de Fès (Fig. 3B)
* Calcareous brown soil of the Fès area

L'étude de la séquence des sols le long du versant (REVEL, 1982) avait montré que le calcaire pouvait provenir aussi bien des horizons supérieurs avec lixiviation verticale que des sols situés en amont par lixiviation oblique.

L'observation des mêmes sols développés dans la molasse sableuse très tassée montre une disposition en lits subhorizontaux des accumulations calcaires dans lesquelles restent localisées toutes les racines. Or, ces sables, même lorsqu'il n'y a pas de CaCO₃ d'accumulation, se délitent en plaquettes subhorizontales.

B) DISCUSSION

Dans les sables, comme dans les marnes où la structure est prismatique, les amas friables restent localisés dans les vides structuraux du matériau hôte. Il semble qu'il y ait une lithodépendance des accumulations calcaires.

Cette accumulation paraît débiter par des pseudomycéliums localisés dans les vides du sol ou dans les zones de plus faible résistance mécanique. La plupart des fines racines et des radicelles s'y développe. On remarque une densification des pseudomycéliums qui s'anastomosent et deviennent coalescents. L'accumulation carbonatée prend alors l'allure d'un mince amas friable. Puis il apparaît un débordement du CaCO₃ dans le fond matriciel avec épigénie de celui-ci. C'est donc à une véritable filiation que l'on a affaire. Etant donné l'origine pseudomycélienne et la réelle proximité des racines, on

peut dire que l'accumulation carbonatée, au moins dans les premiers stades, est biodépendante.

On retrouve donc les concrétions de WIEDER et YAALON (1974 et 1982) et les nodules de ROGNON *et al.* (1987), mais au lieu de présenter une forme arrondie, ici, ils sont déformés et s'anastomosent dans les fissures du matériau hôte où passent les racines. WIENER et YAALON (1982) considèrent que la précipitation de la calcite est due aux variations de la pression de CO₂ sous l'effet de la respiration des racines. RUELLAN (1967) considère que le pseudomycélium est une précipitation à proximité des zones d'absorption racinaire : la végétation absorbant l'eau provoque une concentration des sels qui cristallisent. La végétation se conduit vis-à-vis du sol comme un évaporateur du milieu au niveau des racines. CALLOT *et al.* (1985) montrent qu'il peut également exister une inter-relation entre les aiguilles de calcite et les mycéliums de champignons. Plus récemment, JAILLARD (1987) voit dans les structures rhizomorphes une accumulation des carbonates dans les cellules des racines et une réorganisation de la fraction insoluble autour de celles-ci. Lorsque ces racines disparaissent, la calcite reste sur place.

II. LES AMAS FRIABLES ET LES NODULES DANS LA RÉGION DE FÈS

L'exemple choisi est un sol brun calcaire, localisé sur une faible pente reliant une terrasse du Pléistocène moyen aux versants d'une colline marneuse, à 54 km à l'est de Fès (34° 03' 27" N, 4° 55' 00" E), dans la vallée du Sébou (Fig. 1).

Ouvert aux influences atlantiques de par son orientation est-ouest, le bassin du Sébou est relativement bien arrosé puisqu'il reçoit en moyenne annuelle 550 mm d'eau. Le régime annuel des pluies se caractérise par une concentration des précipitations de novembre à mai, avec deux maxima, l'un en décembre, l'autre en mars. De juin à octobre s'instaure une saison sèche pendant laquelle souffle épisodiquement un vent chaud et sec venant du sud-est, le Chergui.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 18°C, avec comme mois les plus chauds : juillet (26,7°C) et août (27,1°C). Le diagramme ombrothermique de Gaussen (Fig. 2) montre une longue période de sécheresse allant de la fin mai jusqu'à la mi-septembre, avec un maximum en juillet-août ; l'évapotranspiration potentielle est de 913 mm/an.

Les études menées sur l'ensemble des formations alluviales du bassin (LAOUINA, 1973 ; KAEMMERER, 1987) montrent que ce sont les terrasses du Pléistocène moyen (Tensiftien) qui sont les mieux conservées. C'est sur celles-ci que se trouvent les sols les plus épais et les plus différenciés, développés dans la couverture meuble superficielle.

Les sols caractéristiques de ces formations alluviales sont des sols bruns calcaires isohumiques argileux à argilo-limoneux.

A) DESCRIPTION

Le profil retenu se présente comme suit (Fig. 3B) : sous un horizon perturbé d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, se développe un horizon relativement épais

AMAS ET NODULES CALCAIRES

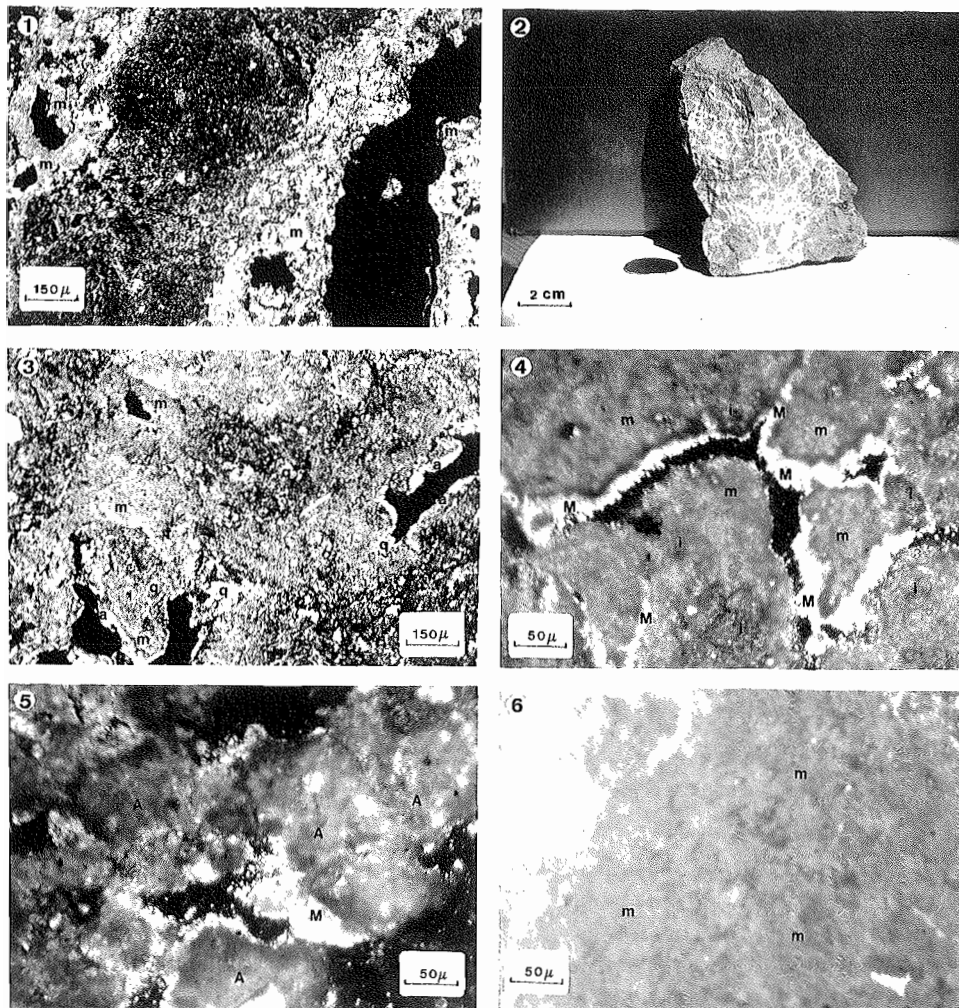


Photo 1 : Couronne micritique (m) autour des pores tubulaires.

Micrite halo (m) on the walls of tubular pores.

Photo 2 : Anastomose des pseudomycéliums.

Anastomizing of pseudomycelia.

Photo 3 : La micrite (m) déborde dans le fond matriciel où l'on reconnaît des grains du squelette (q) ; la paroi du pore est tapissée d'un argillane (a).

Micrite impregnates the S.Matrix (m) in which skeleton grains (q) are evident ; the walls of the pore are covered by an argillan (a).

Photo 4 : Amas friable avec une micrite au centre (m), de la microsparite dans les fissures et les pores (M) et des îlots de fond matriciel (i).

Crumbly mass with micrite in the center (m), microsparite in craze planes and pores (M) and S.Matrix islets (i).

Photo 5 : Couronne microsparitique (M) autour des agrégats.

Halo of microsparite (M) around the aggregates.

Photo 6 : Nodule, micrite (m).

Nodule, micrite (m).

(50 cm), argileux, avec très peu de graviers et de galets, à structure polyédrique subanguleuse nette et généralisée ; l'horizon présente un chevelu racinaire important et, en été, de nombreuses fentes de retrait. La teneur en CaCO_3 est de 19% ; on n'y observe aucune accumulation de carbonate. L'horizon suivant (épaisseur 30 cm) ne se distingue du précédent que par la présence d'un important pseudomycélium ; la teneur en CaCO_3 passe à 26%. Sous celui-ci, se trouve un horizon épais d'une cinquantaine de centimètres, caractérisé par l'absence quasi totale de racines, une structure polyédrique subanguleuse et la présence de nombreux amas friables et quelques nodules blancs, millimétriques à centimétriques, arrondis à subarrondis ; la teneur en CaCO_3 atteint 42%. L'horizon sous-jacent, semblable au précédent, bien qu'un peu plus sableux, ne contient pas d'accumulations carbonatées ; il repose sur un ensemble de sables et de galets. Dans l'ensemble du profil, la teneur en matière organique décroît régulièrement (de 1,1% à 0,5%) et l'attapulгите apparaît dans les horizons d'accumulation, démontrant encore une fois que la néoformation de ce minéral est associée à la précipitation de la calcite (RUELLAN, 1971).

Il ressort de cette étude que l'horizon à pseudomycélium se développe au-dessus de l'horizon à amas friables et à nodules. Ce sont deux horizons distincts et disjoints dans l'espace. C'est la grande différence avec le profil de la région toulousaine où les pseudomycéliums et les amas friables et nodules sont associés dans le même horizon.

Dans ce profil, les amas friables et les nodules sont millimétriques à centimétriques ; ils sont blanchâtres, de forme plutôt arrondie à subarrondie. Le caractère essentiel qui les distingue est la résistance sous la pression du doigt.

À l'échelle microscopique, les traits calcitiques apparaissent d'une grande homogénéité. On note que les amas friables sont toujours constitués (Photo 4) :

- d'une matrice présentant un assemblage dense de cristaux micritiques grisâtres ;
- d'îlots bruns à fond matriciel fait d'un plasma insépique coloré en brun par des imprégnations irrégulières de composés ferriques donnant un aspect d'amas diffus et coalescents. Ce plasma englobe des grains de quartz anguleux à émoussés et des fragments de coquilles de gastéropodes. L'ensemble forme un assemblage porphyrique, comparable au fond matriciel de l'horizon. Ces îlots ont des contours irréguliers et parfois diffus, leur volume et leur nombre augmentant de la périphérie vers le centre des amas friables. Ils peuvent être considérés comme des reliques de la matrice ;
- de cristaux microsparitiques dans les fissures et les pores.

Certains petits agrégats ou fragments d'agrégats de l'horizon présentent seulement une couronne microsparitique, et quelques fissures intra-agrégats montrent, par endroits, quelques cristallisations (Photo 5).

Hormis la présence de micrite dans l'ensemble des amas friables et de la microsparite sur la périphérie, dans les fissures et les pores, c'est la présence d'îlots bruns, dont le nombre croît de la périphérie vers le centre des accumulations calcaires, qui est le fait le plus marquant.

Les nodules ont une forme moins contournée et ils ne montrent plus d'îlots bruns de matrice résiduelle (Photo 6).

B) DISCUSSION

Si on compare avec ce qu'ont vu WIEDER et YAALON (1982), IMBELLONE et TERUGGI (1987) : des microsparites et sparites qui se développent toujours dans des zones où il y a des vides et une micrite constituant la matrice du nodule, on retrouve bien ici le même schéma d'ensemble ; la microsparite se trouve autour des agrégats dans les vides et la micrite précipite dans les matériaux fins argileux. Pour IMBELLONE et TERUGGI (1987), dans des sols loessiques de la Pampa argentine, la sparite est la dernière à avoir précipité et est associée à la présence d'une nappe phréatique. Ici, dans ces sols argileux d'où toute nappe est absente, la couronne microsparitique est observée autour d'agrégats non micritisés. Il est donc probable qu'elle se soit formée la première. Ceci signifie donc que la précipitation de la calcite s'est faite d'abord autour de l'agrégat, puis la micrite a envahi le fond matriciel. L'augmentation progressive du nombre d'îlots du fond matriciel vers le centre de l'amas friable tend à prouver que la progression de la micrite se fait de la périphérie vers le centre.

Etant donné la structure même des amas friables : microsparite externe, micrite interne, avec imprégnation de plus en plus intense de la micrite vers le centre de l'agrégat, nous avons construit une hypothèse qui exclut l'influence directe de la végétation, d'autant que le pseudomycélium lié aux racines est ici spatialement disjoint : durant la saison humide, les eaux de percolation, chargées de carbonates, viennent se stocker dans la porosité très fine des agrégats. A la saison sèche suivante, l'atmosphère du sol se déshydrate et entraîne l'évaporation des solutions à la surface des agrégats, provoquant, dans les grands vides interagrégats, la précipitation de carbonates de calcium. Ceux-ci peuvent cristalliser librement, en présence de peu d'impuretés ; c'est la microsparite à la surface des agrégats et dans les fissures. Puis la couronne microsparitique étant constituée, l'évaporation se poursuivant, elle se produit à l'interface agrégat-microsparite. La présence des particules argileuses gêne la précipitation et induit la cristallisation sous forme de micrite. Progressivement, ces précipitations gagnent le cœur de l'agrégat, avec une disparition progressive des îlots du fond matriciel.

Lorsque la matrice occupe la totalité du volume de l'agrégat, la cimentation est totale et l'on a alors probablement l'initiation du nodule.

Etant donné la disjonction spatiale entre les pseudomycéliums et les amas friables et nodules, on ne peut pas leur attribuer la même filiation génétique : l'origine des pseudomycéliums dans ce sol, comme dans la région toulousaine, reste sous l'influence directe de la végétation. Ces précipitations sont localisées dans la partie supérieure des profils et se produisent au cours de la croissance végétative au printemps, quand les sols sont encore humides. Au-delà de cette période, à mesure que s'installe la saison sèche et chaude, le développement végétatif se bloque et c'est à ce moment qu'en profondeur la déshydratation de l'atmosphère du sol induit la formation des amas friables et des nodules.

Dans ce cas, malgré une répartition entre micrite et sparite semblable à celle vue par WIEDER et YAALON (1982) dans les nodules, la végétation ne jouerait aucun rôle. Ce serait plutôt l'évapotranspiration directe, telle que ROGNON *et al.* (1987) le pensent, qui interviendrait.

Donc, des formes voisines d'accumulations calcaires peuvent résulter de causes différentes. C'est un cas de convergence morphologique.

Si ces deux processus paraissent clairement distincts dans les cas précis ici décrits, il se peut que localement on ait des amas friables sous la dépendance de la végétation dans des zones semi-arides à arides présentant la même répartition entre micrite et sparite ; cependant, on observe plutôt, dans ce cas, une structure concentrique (WIEDER et YAALON, 1982).

Il ne semble pas que la faune du sol ait une importance essentielle dans les sols ici étudiés puisque l'on n'observe pratiquement pas de bioturbation, contrairement à ce qu'ont observé COURTY et FEDOROFF (1985) dans d'autres types de sols.

CONCLUSION

Dans le Terrefort toulousain, les accumulations calcaires sont apparemment lithodépendantes et en réalité biodépendantes, au moins dans les premiers stades, même si elles se calquent sur des vides structuraux du matériau hôte. La végétation est le facteur essentiel de la précipitation.

En région plus sèche, le même phénomène existe au niveau des pseudomycéliums. Mais le climat seul, avec la période de sécheresse estivale, peut prendre le relais du rôle desséchant de la végétation et la calcite précipite à partir des solutions par évaporation directe. Il y a une double disjonction entre les deux processus, aussi bien spatiale que temporelle, au cours de l'année. Ici encore, il est possible que la nature du matériau hôte (sol bien structuré) influe sur la forme des accumulations.

Dans les deux cas, macroscopiquement, on note une convergence morphologique, alors que les microstructures sont totalement différentes et permettent, en suivant les divers stades de formation, d'émettre des hypothèses sur leur genèse : évaporation directe en climat semi-aride, influence de la végétation en région tempérée.

Reçu pour publication : Octobre 1989

Accepté pour publication : Juillet 1990

BIBLIOGRAPHIE

- BOCK L., 1984. – *L'intégration chronospatiale des accumulations calcaires. Approches morphopédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie)*. Thèse Doct. en Sci. Agron. de l'Etat, Gembloux (Belgique), 448 p.
- BUTEL P., 1982. – *Formes et mécanismes de l'accumulation carbonatée dans les sols de la plaine poitevine*. Thèse de 3^e cycle, Univ. Poitiers, 123 p.
- CALLOT G., GUYON A. et MOUSAIN D., 1985. – Interrelation entre aiguilles de calcite et hyphes mycéliens. *Agronomie*, 5, 3, 209-216.
- Comptes rendus du Colloque *Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale*, Strasbourg, 1975, 150 p.
- Comptes rendus du Colloque *Cristallisation - déformation - dissolution des carbonates*, Bordeaux, 1980, 450 p.

- COURTY M.A. & FEDOROFF N., 1985. – Micromorphology of recent and buried soils in a semi-arid region of Northwestern India. *Geoderma*, **35**, 287-332.
- DURAND R., 1978. – *La pédogenèse en pays de craie dans le Nord-Est de la France*. Thèse Sci., Strasbourg, 176 p.
- FEDOROFF N. et COURTY M.A., 1989. – Indicateur pédologique d'aridification. Exemples du Sahara. *Bull. Soc. Géol. France*, **8**, t. V, n° 1, 43-53.
- IMBELLONE P.A. & TERUGGI M.E., 1987. – Discontinuous calcretes in loessic paleosoils near La Plata, Argentina. In : *Micromorphologie des sols*, N. Fedoroff, L.-M. Bresson, M.-A. Courty (eds). VII^e Réunion Internationale de Micromorphologie des Sols, Paris, 1985, 625-630.
- JAILLARD B., 1980. – *Fonctionnement hydrique d'un sol carbonaté. Incidence sur la chlorose ferrique*. Thèse 3^e cycle, Univ. Montpellier, 131 p.
- JAILLARD B., 1987. – *Les structures rhizomorphes calcaires : modèle de réorganisation des minéraux du sol par les racines*. Thèse Univ. Sci. et Tech. du Languedoc, Montpellier, 221 p.
- JAILLARD B. et CALLOT G., 1987. – Action des racines sur la ségrégation minéralogique des constituants du sol. In : *Micromorphologie des sols*, N. Fedoroff, L.M. Bresson, M.A. Courty (eds). Réunion Internationale de Micromorphologie des Sols, Paris, 1985, 371-375.
- KAEMMERER M., 1987. – *Etude des sols et des encroûtements calcaires sur les formations alluviales quaternaires du Sébou et de la moyenne Moulouya (Maroc)*. Thèse Univ. Toulouse III, 318 p.
- LAOUINA A., 1973. – Observations géomorphologiques dans la région du moyen Sébou, en amont de Fès. *Revue de Géog. du Maroc*, **23/24**, 95-122.
- MOREAU R., 1981. – Matériaux superficiels et paléogenèse dans la région de Marrakech (Maroc). *Trav. Doc. ORSTOM*, n° 139, 237 p.
- NAHON D., 1976. – *Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal oriental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et conséquences*. Thèse Sci., Marseille, 232 p.
- NAHON D., MILLOT G., PAQUET H., RUELLAN A. et TARDY Y., 1977. – Géochimie de la surface et formes du relief. VII. Digestion et effacement des cuirasses ferrugineuses par les encroûtements calcaires en pays aride, Sahara et Mauritanie. *Sci. Géol. Bull.*, **30**, 4, Strasbourg, 289-296.
- POUGET M., 1980. – Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. *Trav. Doc. ORSTOM*, n° 116, 555 p.
- REVEL J.-C., 1982. – *Formation des sols sur marnes. Etude d'une chronoséquence et d'une toposéquence complexe dans le Terrefort toulousain*. Thèse INP - ENSAT Toulouse, 250 p.
- REVEL J.-C. et BOURGEAT F., 1985. – Transformation des carbonates dans une séquence de sols développés sur marnes dans le Bassin Aquitain, France. *Geoderma*, **36**, 123-143.
- ROGNON P., COUDE-GAUSSIN G., FEDOROFF N. & GOLDBERG P., 1987. – Micromorphology of loess in the Northern Negev (Israël). In : *Micromorphologie des sols*. VII^e Réunion Internationale de Micromorphologie des Sols, Paris, 1985, 631-638.
- RUELLAN A., 1967. – Individualisation et accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts quaternaires du Maroc. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, **XVI** (1), 8-21.

- RUPELLAN A., 1971. – Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols à profil calcaire différencié des plaines de la basse Moulouya (Maroc oriental). *Mémoire ORSTOM n° 54*, Paris, 302 p.
- RUPELLAN A., NAHON D., PAQUET H. et MILLOT G., 1977. – Géochimie de la surface et formes du relief. VI. Rôle des encroûtements et épigénies calcaires dans le façonnement du modelé en pays aride. *Sci. Géol. Bull.*, **30**, 4, 283-288.
- VAN VLIET-LANOË B., 1988. – *Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'Ouest*. Thèse Géog. Paris I, t. 1 et 2, 854 p.
- VERGES V., 1982. – *Contribution à l'analyse et à la représentation cartographique des formations pédologiques en moyenne montagne calcaire (Mt Ventoux)*. Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII, 226 p.
- VOGT T., 1983. – *Types et genèse de croûtes calcaires : France méditerranéenne, Afrique du Nord*. Thèse Univ. P.-et-M.-Curie, Paris, 253 p.
- WIEDER M. & YAALON D.H., 1974. – Effect of matrix composition on carbonate nodule crystallization. *Geoderma*, **11**, 95-121.
- WIEDER M. & YAALON D.H., 1982. – Micromorphological fabrics and developmental stages of carbonate nodular forms related to soil characteristics. *Geoderma*, **28**, 203-220.