

L'ANALYSE DE LA GENÈSE DE LA PLYGORSKITE DANS  
LES FORTES ACCUMULATIONS CALCAIRES EN ZONE  
ARIDE D'ALGERIE. (1).

par A. HALITIM et M. ROBERT

Département des Sciences du Sol

Institut National Agronomique .- Alger .-

Station Science du Sol - INRA .- Versailles .-

خلاصة :

=====

يعتبر وجود المعادن الليفية احدى الصفات الخاصة  
بشكل عام الاثرية المناطق الجافة من بين ذلك المعادن يبدوا  
ان معدن الباليغورسكيت أكثر وفرة، هناك عدة فرضيات  
مقبولة في هذا المضمار بأن هذا الطين يعتبر حسب بعض  
المولفين موروث حديثة التشكل أو من التحولات

بل ان الهدف من هذا العمل واستنادا الى المعطيات الجيوكيميائية  
والتحديينية هو دراسة تكون الباليغورسكيت في التجمعات الكلية  
القوية في المناطق الجافة في الجزائر (منطقة بوغزول)

يتخلص من النتائج المتحصّل عليها أن الباليغورسكيت في  
المناطق المدروسة يكون احدى المعادن الطينية حديثة لتشكل  
ومن المحتمل ان يكون من أصل مستحاثات تربية تم تشكيله  
في وسط مغلق اعتبارا من عناصر متحوّله بواسطة المياه  
القنوية أو ناتجة من تحطم المعادن الصفائحية والكوارتس  
في الاثرية.

---

(1) Communication présentée au XIII Congrès de l'Association  
Internationale de la Science du Sol. Hamburg, 13-20.8.1986.

## Résumé

La présence de minéraux fibreux constitue un caractère généralement spécifique des sols des zones arides. Parmi ces minéraux la palygorskite semble la plus abondante. Différentes hypothèses sont couramment admises et cette argile est considérée, selon les auteurs comme un minéral hérité, néoformé ou de transformation.

Le but du travail est d'étudier à partir de données géochimiques et minéralogiques la genèse de la palygorskite dans les fortes accumulations calcaires en zones aride d'Algérie (région du Boughzoul).

Il ressort des résultats obtenus, que la palygorskite dans les régions étudiées est un minéral argileux néoformé, probablement d'origine paléo-pédologique. Sa formation s'effectue dans les milieux confinés à partir d'éléments transportés par les eaux, alcalins ou issus de la destruction des minéraux phylliteux et du quartz des sols.

## INTRODUCTION

La présence de minéraux fibreux constitue un caractère généralement spécifique des sols des zones arides, bien que ces minéraux aient été également trouvés dans les milieux sédimentaires très variés (continental, lacustre, marin). Parmi les minéraux fibreux la palygorskite (ou attapulgite) semble la plus abondante; néanmoins la présence de sépiolite a été quelquefois signalée (ABTAHI et al., 1980).

Pour la sépiolite, tous les auteurs sont unanimes pour une néoformation qui a pu d'ailleurs être réalisée en laboratoire, dans des conditions de basse température et de pression normale (WOLLAST et al., 1986). Pour la palygorskite, différentes hypothèses sont couramment admises (SINGER, 1979) et cette argile est considérée, selon les cas, comme un minéral hérité, néoformé ou de transformation diagénétique.

- pour MUIR (1951), ELGABALY (1962), et WIEPSMA (1970), la palygorskite est héritée des roches-mères :
- pour YAALON et WIEDEP (1976) la palygorskite pourrait provenir de la transformation des smectites par addition de  $Mg^{++}$  libéré par la calcite magnésienne. Cette idée de la palygorskite de transformation a également été avancée par TRAUTH (1977) , EL PRINCE et al., (1979), VIANI et al., (1983) et REGAYA (1977).
- mais, parmi les hypothèses présentées, c'est celle de la néoformation qui a fait l'objet de travaux les plus nombreux, en particulier VANDEN HAUVEL (1966), ALRAWI et SYS (1967). MILLOT et al., (1969), trouvent que la palygorskite présente des teneurs maximums dans l'encroûtement et une partie de la croûte calcaire par rapport aux horizons sous-jacents et sus-jacents et concluent à une néoformation pédogénétique de ce minéral en liaison avec la carbonatation des profils. ESWARAN et BARZANJI (1974), sur la base d'observations au microscope à balayage, concluent que la palygorskite s'est néoformée dans les sols gypseux après la cristallisation du gypse. Certains auteurs (BELOUAM, 1971) ; DEKKICHE (1974) avancent même l'hypothèse selon laquelle le

gypse oriente sa formation . ABIAHI (1977) en se fondant sur le fait que la montmorillonite néoformée est instable dans les conditions alcalines et salines (HADEN, 1963) et sur la différence de capacité d'échange de la fraction argile entre le haut et le bas du profil, conclut à une néoformation de la palygorskite à partir des produits issus de la destruction de la montmorillonite . Enfin SINGER et NORRISH (1974) pensent qu'une néoformation de la palygorskite est invraisemblable.

### MATERIEL ET METHODES

Les analyses dont il va être question ici ont été faites sur des accumulations calcaires développées dans des argiles rouges du Mio-pliocène situées à 10 Km au Sud du village du Boughzoul (488,6 ; 3.942,5 feuille J.K. 5-6 1/200.000) . Il s'agit d'une butte culminant à 680 m dont la partie amont montre de haut en bas la succession des accumulations suivantes :

- un horizon gypseux ; une dalle calcaire, très fragmentée, une croûte calcaire feuilletée ; un encroûtement calcaire pulvérulent et riche en nodules calcaires ; un horizon nodulaire ; des argiles rouges très peu calcaires (< 5% ) à la base.

Une analyse physique et physico-chimique par des méthodes classiques (BONFILS, 1967) a été effectuée.

L'extraction et la préparation des argiles pour les études minéralogiques ont été réalisées selon le protocole préconisé par ROBERT et TESSIER (1974).

Tableau 1.- Sommet de la séquence du Boughzoul - Données analytiques

Echantillons	Profondeur cm	Calcaire %	Gypse %	C.E. mmhos. $\text{Cm}^{-1}$	pH 1/2,5	M.O %	C $\text{Ca}^{++}$	Mg $^{++}$	Na $^{+}$	K $^{+}$	$\text{SO}_4^{--}$	Cl $^{-}$	$\text{HCO}_3^{-}$
Dalle calcaire	20-40	79,3	15,7	2,1	7,8	0,5	27,1	0,5	0,7	0	24,2	Trace	0,9
Croûte calcaire	40-70	53,8	35,6	2,5	7,9	0,7	35,7	0,6	0,7	0	35,0	Trace	0,66
Horizon nodulaire (nodules)	80-260	87,0	1,1	3,2	8,6		18,0	2,4	16,9	Trace	14,7	15,2	1,2
Horizon nodulaire (matrice rougeâtre)	80-260	42,7	2,8	7,7	8,5	0,7	23,7	16,9	2,17	1,15	29,4	16,0	1,0
Horizon C (zones blanches)	260-710	65,0	1,5	12,3	7,5		27,0	19,7	75,2	0,3	53,2	73,0	1,3
Horizon C (matrice rougeâtre)	260-710	18,7	3,2	14,3	7,3		37,0	27,4	88,7	0,4	63,3	121,7	0,66
Argiles rouges	710	5,0	4,3	18,9	8,2		28,5	41,4	161,3	1,2	109,2	111,6	0,3

L'analyse minéralogique a demandé :

- une détermination semi-quantitative sur 50 échantillons à l'aide des seuls diagrammes de rayons X, pour avoir une idée sur l'évolution et l'importance relative d'un minéral par rapport aux autres minéraux argileux, d'un horizon à l'autre même profil ou tout au long de la séquence. Pour cela, nous avons effectué à chaque minéral un certain nombre de choix selon sa teneur relative dans l'échantillon analysé, appréciée à partir de la hauteur des pics de diffraction.
- sur un nombre plus réduit d'échantillons, nous avons utilisé plusieurs méthodes : diffraction des rayons X, analyse thermique différentielle, analyse totale, mesure de la capacité d'échange.

## RESULTATS

Les analyses physiques et physico-chimiques font ressortir que :

- l'analyse chimique indique par rapport à la dalle, une augmentation au niveau de la croûte de la teneur en gypse au détriment du calcaire et une proportion légèrement plus grande d'argile (Tableaux 1 et 2).
- la texture de ces horizons est très hétérogène, ce qui s'explique par l'origine sédimentaire du matériau. Il n'est pas possible d'y déceler une quelconque dynamique de l'argile, si ce n'est une augmentation de ce minéral au niveau de l'horizon nodulaire par rapport aux horizons sous-jacents. Par contre,

Tableau 2.- Analyse granulométrique

Echantillons	Fractions granulométriques				
	Argile	Limons Fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers
Dalle calcaire	2,1	10,5	8,0	18,3	61,1
Croûte calcaire	4,5	15,3	12,5	19,4	48,3
Horizon nodulaire (zones blanches)	3,7	7,5	6,5	17,5	64,8
Horizon nodulaire (zones rougeâtres)	16,7	5,7	7,3	12,3	58,0
Horizon calcaire (zones blanches)	8,8	9,3	9,5	20,3	52,0
Horizon calcaire (zones rougeâtres)	20,7	7,0	5,3	12,8	54,2
Argiles rouges	27	4,5	15,3	14,6	35,6

on note la diminution de la proportion de sables et de limons grossiers, constitués presque uniquement de quartz quand on remonte dans la coupe, sans que cette baisse de la teneur en quartz ne soit à mettre en parallèle avec une variation des proportions des différentes fractions granulométriques (tableau 2.).

- la teneur en  $\text{CaCO}_3$ , très faible dans l'horizon gypseux augmente fortement dans la dalle, puis diminue plus ou moins régulièrement pour atteindre dans la roche-mère des valeurs très faibles.
- les résultats de l'analyse des fractions quartzeuses et carbonatées suggèreraient une dissolution des cristaux de quartz parallèlement à la carbonatation du milieu.
- les teneurs relativement faibles en calcaire observées dans la croûte calcaire, seraient en relation avec la présence de gypse dont la concentration est d'ailleurs maximale en surface, mais diminue rapidement au-delà de l'encroûtement. Cependant, comme dans le cas du calcaire on doit rappeler que la distribution intra-horizon en gypse est irrégulière.
- en ce qui concerne la salinité, on constate que la concentration en sels solubles, ainsi que le rapport  $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$ , augmentent avec la profondeur, mais le faciès salin reste partout de type chlorure sodique.



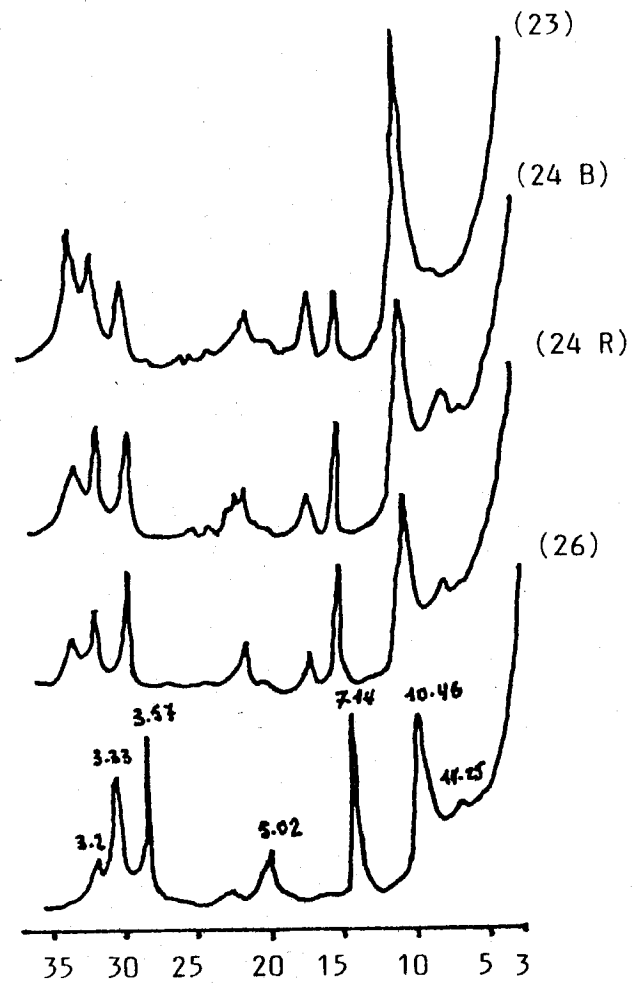


Fig.1.- Comportement aux rayons X des fractions "argiles " de la coupe du Bougzoul.

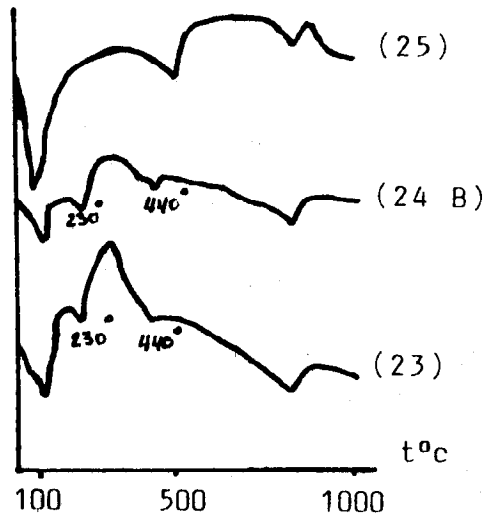


Fig.2.- Comportement à l'A.T.D. des fractions argiles de la coupe de Boughzoul

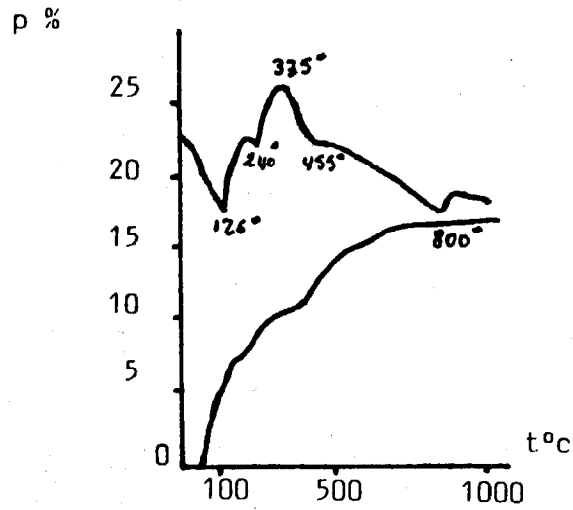


Fig.3.- Courbes d'A.T.D. et d'A.T.G. de la croûte calcaire de Boughzoul (échantillon 23)

Du point de vue minéralogique dans cette coupe réalisée sur 7 m de profondeur, l'élément essentiel à signaler est que la palygorskite se trouve en très faible quantité (Tableau 3) dans les argiles rouges, mais constitue en revanche, l'argile principale (fig. 1 et 2) dans la croûte calcaire.

Tableau 3 .- Coupe de Boughzoul-composition minéralogique de la fraction "argile ".

Minéraux	S	I	P	C	K	Q
Horizon						
Dalle calcaire 22	+	+	+++	+	+	+
Croûte calcaire 23	+	+	+++	+	+	+
Horizon nodulaire blanche 24B	+	+	+++	+	+	+
Horizon nodulaire zones rouges 25B	+	++	++	+	+++	+
Horizon C 25R	+	++	++	+	+++	+
Horizon C 25 R	+	+++	+	+	+++	+
Argiles rouges 26	+	++	Traces	+	+++	+

Si on se base sur les courbes d'A.T.G. des pertes de poids de la fraction argile dans la croûte calcaire (Fig. 3), la

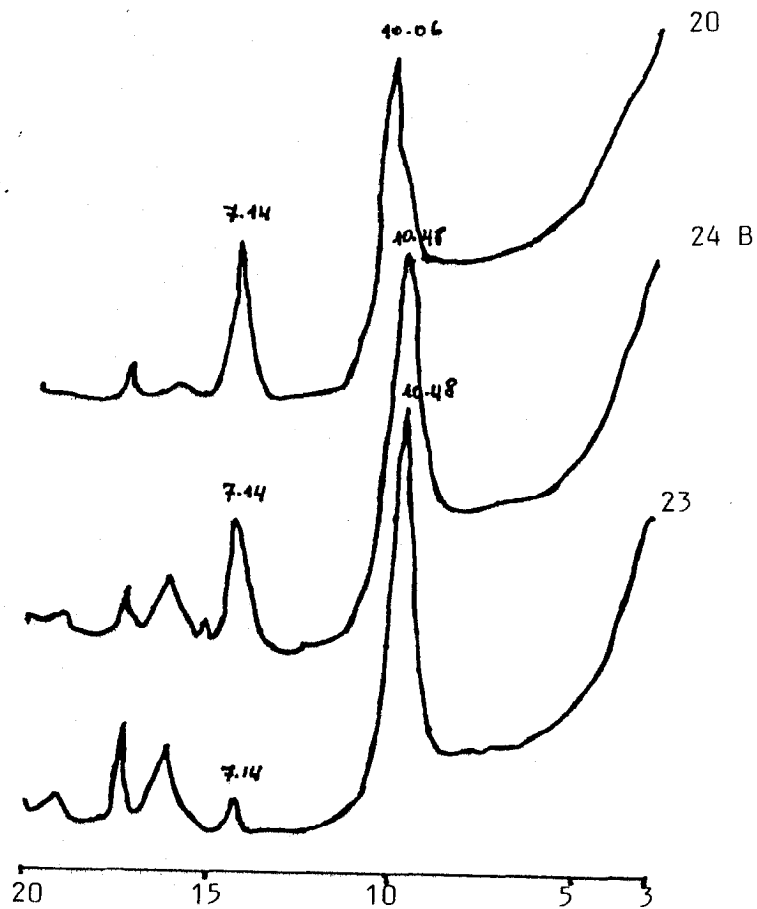


Fig.4.- Cristallinite de la kaolinite par comparaison de la largeur à mi-hauteur de d001 sur poudre (coupe de Boughzoul)

palygorskite représente au moins 80% de cette fraction. Parallèlement, l'illite passe de 40% dans les argiles rouges, à 11% dans la croûte calcaire. Il n'est pas possible malheureusement de suivre la cristallinité de l'illite par la largeur à mi-hauteur du pic de 10A selon la méthode préconisée par KUBLER (1966), à cause de la présence de palygorskite.

La kaolinite passe de 50% dans les argiles rouges à 5% dans la croûte calcaire. Cette évolution qui s'accompagne d'une perte de cristallinité (constatée sur le pic d001) (Fig.4) de la base au sommet peut laisser supposer une disparition de ce minéral. La chlorite (plus ou moins dégradée) et les smectites sont en quantités très faibles et ne subissent pas de changement notables le long de la coupe.

L'évolution géochimique de la fraction argileuse révèle que la silice reste pratiquement inchangée le long de la coupe (Tableau 4) en revanche, les rapports  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Ki) et  $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  augmentent de la base au sommet. L'évolution de ces deux rapports suit ainsi les variations des teneurs en palygorskite dans la fraction argileuse. L'augmentation de la proportion de palygorskite s'est traduite par une diminution de la capacité d'échange. Dans la croûte calcaire, la capacité d'échange de la fraction argile est de 18 meq/100 gr pour 80% de palygorskite, ce qui est approximativement en accord avec les résultats de CAILLERE et al., (1982) relatifs à la capacité d'échange de cette argile.

Il est important de noter, par ailleurs, que pour un même horizon il existe une forte différence de teneur en palygorskite d'un point à l'autre. C'est ainsi que, dans l'horizon nodulaire, les zones d'individualisation de calcaire coïncident avec une forte proportion

Tableau 4.-Composition de la fraction argileuse (en %) sur : minéral séché à l'air et CEC (en meq/100).

Echantillons	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Li ppm	C E C
22 Haut de profil	52,6	10,7	4,6	8,9	0,1	0,9	0,01	0,4	24	18,4
24 R	50,6	15,9	4,67	4,7	0,03	2,01	0,04	0,6	35,8	
25 R	49,8	17,4	4,6	4,7	0,01	2,2	0,03	0,6	43,9	35,8
26 Bas de profil	50,1	17,25	4,6	4,8	0,04	2,1	0,05	0,7	47,9	37,6

de palygorskite (Fig. 1 et Tableau 4) par rapport au fond matriciel.

### DISCUSSION ET CONCLUSION

La palygorskite est une argile caractéristique des sols des régions arides. De nombreuses hypothèses ont été avancées quant à sa genèse. Nous avons analysé cette dernière à travers le cas de la coupe du Boughzoul. On note, dans les matériaux rouges très peu calcaires (< 5 %) trois minéraux argileux dont les proportions sont différentes d'un horizon à l'autre mais non quelconques : kaolinite, illite, palygorskite. La présence simultanée de la kaolinite et de la palygorskite, en quantités appréciables laisse penser que ces matériaux ont subi plusieurs processus. En effet, les conditions de genèse de ces argiles sont totalement différentes comme le montre leur diagramme de stabilité (Fig.5). On suppose que la genèse de ces deux argiles ne s'est pas faite en même temps et que la palygorskite s'est formée postérieurement à la rubéfaction du matériau.

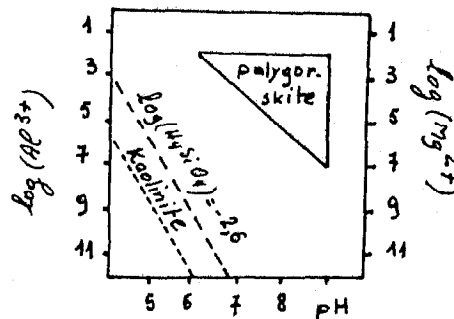


Fig.5.- Domaine de stabilité de la palygorskite (SINGER et NORRISH, 1974) exprimés en termes d'activités  $H^+$  et  $Mg^{++}$  (les activités d'Al, Fe sont considérées pour un pH 6-9) et de la kaolinite (TRUESEDEL et JONES, 1974) exprimée en termes d'activités d' $Al^{3+}$  et  $H^+$ .  
Kaolinite :  $\log K = 7,41$  et palygorskite :  $\log K = -3,99$ .

Les observations microscopiques sur les échantillons non remaniés (HALITIM et al., 1981) et le gradient de concentration régulier de la palygorskite, dans la fraction argileuse le long de la coupe, nous suggère de privilégier une formation in situ à une origine sédimentaire.

Au sujet de la genèse in situ de cette argile, deux possibilités sont à envisager : une transformation à partir de minéraux précurseurs et une néoformation. Seule la néoformation est possible pour les raisons suivantes :-

- les minéraux primaires susceptibles de se transformer en palygorskite sont pratiquement absents ;
- parmi les minéraux secondaires précurseurs, seule l'illite (les smectites sont à l'état de traces) est en quantité importante. Mais les conditions physico-chimiques (teneur en  $K^+$  soluble élevée) et hydrodynamiques ne sont pas favorables à la transformation de l'illite.

Dans la coupe du Boughzoul, la palygorskite existe partout, mais à des teneurs très variables, allant de quantités non détectables aux rayons X dans les argiles rouges à 80% dans la croûte et la dalle calcaire. D'autre part, dans un même horizon, tel par exemple l'horizon nodulaire, la quantité relative de palygorskite est beaucoup plus importante dans les nodules calcaires que dans le fond matriciel. De plus, il est important de noter que la teneur en argile est inversement proportionnelle au pourcentage de calcaire.



L'enrichissement en palygorskite de la fraction argileuse lors de l'accumulation du calcaire peut-être dû :

- . à une diminution relative du minéral
- . et/ou une néoformation au cours des processus pédogénétiques.

Certains arguments viennent à l'appui des deux hypothèses :

- . la palygorskite est présente dans toute la formation, avec des teneurs variant entre des traces et 80% de la fraction argileuse ;
- . la teneur en illite baisse de 30 à 11% de bas en haut de la coupe et celle de la kaolinite de 50 à 4% ;
- . la fraction argileuse dans les milieux calcaires est riche en éléments amorphes (Si et Al) à côté de la palygorskite qui paraît assez stable.
- . La cristallinité de la kaolinite diminue de bas en haut de la coupe. En revanche , la deuxième hypothèse, c'est à dire la néoformation, peut-être justifiée dans la mesure où par des études microscopiques on a pu mettre en évidence une néoformation de palygorskite concomittante avec la dissolution du quartz.

Ces différentes considérations nous amènent à proposer l'explication suivante quant à la présence de la palygorskite dans cette coupe : après le dépôt du matériau argilo-sableux, rubéfié, au pliocène, le climat se serait aridifié et les solutions se seraient concentrées. Au Villafranchien une migration des solutions

salines carbonatées (riches en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ ) a pu avoir lieu à travers ce matériau, donnant naissance à des horizons de sols. Il s'agit là de processus pédologiques. Ces solutions carbonatées, à pH élevé, provoqueraient une dissolution des constituants du sol (quartz et argiles).

Les produits issus de la dissolution (Al, Si et Mg), pourraient alors participer à la genèse de la palygorskite. Cette argile est donc pédogénétique. La poursuite de l'accumulation calcaire ou une redistribution du calcaire peut entraîner, quant il y a une déficience en  $\text{Mg}^{++}$ , la destruction de tous les minéraux argileux, mais avec une protection relative et temporaire de la palygorskite, qui à son tour, devient instable.

#### BIBLIOGRAPHIE

- ABTAHI A., (1977).- Effect of saline and alkaline groundwater on soil genesis in semi-arid southern Iran, Soil Sci.Soc. Amer. J., 41, 583-587.
- ABTAHI A., ESWARAN H., STOOPS G., et SYS C. (1980).- Mineralogy of soil sequence formed under the influence of saline and alkaline conditions in the Sarvestan bassin (Iran). Pédologie, XXX,2, 283-304.
- AL-RAWI G.J. and SYS C. (1967).- A comparative study between Euphrate and Tigris sediments in the Mesopotamian flood plain. Pédologie, V 17,187-211.
- BELOUAM N. (1971).- Contribution à la connaissance des sols de la région de Souk Ouled Nadja (Hodna,Algérie) Thèse Université de Gand Belgique, 221 p.
- BONFILS P. (1967).- Méthodes d'analyses des sols S.E.S., n°91 I.N.R.A.- Montpellier , 156 p.

- CAILLIERE S., HENIN S. et RUTUREAU M. (1982).- Minéralogie des argiles, Masson Ed. Tomes 1 et 2, 184 et 189 p.
- DEKKICHE B., (1974) .-Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe.  
Thèse Univ.Gand,Belgique, 210 p.
- EL GABALY M.M. (1962).-The presence of attapulgite in some soils of the western desert of Egypt.Soil Sc. T. 93, 387-390.
- ELPRINCE A.M., MASHLADY A.S. and ABA-HUSAYN N.M. (1979).- The occurrence of pedogenic palygorskite (attapulgite) in Saudi Arabia, Soil Sci., 128, 211-218.
- ESWARAN H. et BARZANJI A.F. (1974).- Evidence for the neoformation of attapulgite in some soils of Irak. Congrès Int. Science du Sol, Moscou, 154-151.
- HADEN (1963) .-In ABTAHI (1977), Ref. citée.
- HALITIM A., ROBERT M., BERRIER J. (1981).- A microscopy study of quartz evolution in arid areas. Soil micromorphology, 2, 615-621.
- HESS (1966) .-In ABTAHI (1977). Ref. citée
- KUBLER B. (1968) .-Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. Bull. Centre. Rech.Pau, S.N.P.A.Z., 2, 385-397.
- MILLOT G., PAQUET A. et RUELLAN A. (1969).- Néof ormation de l'attapulgite dans les sols à carapaces calcaires de la Basse Moulouya (Maroc oriental). C.R. Acad. Sci. Paris,t. 268, Série D,274-277.
- MILLOT G., NAHON D., PAQUET H., RUELLAN A. et TARDY Y. (1977).- L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays sub-aride de Anti-Atlas ,Maroc, Sci. Géol. Bull.Strasbourg, 30,3,129-152.
- MUIR A. (1951) .-Notes on the soils of Syria. J. Soil. Sci. 4, 48-55.

- PAQUET G. (1983) .- Stability instability and significance of attapulgite in the calcrets of mediterranean and tropical area with marked dry season. Actes du Colloque de Pétrologie C.N.R.S., Paris, in Sc. Géol., Mém., 72 p.
- REGAYA K. (1963) .- Etude géologique de la formation des limons de Matmata (Sud Tunisien). Thèse 3ème cycle, Univ. Aix Marseille III, 121 p.
- ROBERT M. et TESSIERS D. (1974).- Méthode de préparation des argiles des sols pour études minéralogiques. Ann. Agron. 25, (6) 859.
- SINGER A. (1979) .- Palygorskite in sediments : Detrital, diagenetic or néoformed-A critical review. Sonderdruck ans der geologischen Raudschau Band 58, 99-1008.
- SINGER A. et NORRISH K. (1974).- Pedogenic palygorskite occurrence in Australia. Am. Miner. 50, 508-517.
- TRAUTH A. (1977) .- Argiles évaporitiques dans la sédimentation carbonatée continentale tertiaire Bassin de Paris, de Mormoiron et de Salinelles (France), Jbel Gassoul (Maroc). Thèse d'Etat Strasbourg, 304 p.
- TRUSDELL A.H. et JONES B.F. (1974).- WATEQ , a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters, J. Res. Geol. Surv., 2, (2) 233-248.
- VAN DEN REUVEL R.C. (1966).- The occurrence of sepiolite and attapulgite in the calcareous zone of a soil near Las Cruces, New-Mexico, Clays and clay minerals, 193-206.
- VIANI B.E., AL MASHADY A.S. and DIXON J.B. (1983).- Mineralogy of Saudi Arabian soil central alluvial basins. Soil Sci. Soc. Amer. J. 47, 149-157.
- WEAVER C.E. and BECK K.C. (1977).- Miocene of the S.E. United states a model for chemical sedimentation in a peri-marine environment. Dev. in Sedimentology, 22, Elsevier, 134 p.

- WIERSMA J. (1970) .- Provenance , genesis and paleogeographical implications of microminerals occurring in sedimentary rocks of the Jordan valley area. PH. D. Thesis University of Amsterdam.
- WOLLAST R., FRED L., MACKENZIE F.T. and BRICKER P. (1968) .- Experimental precipitation and genesis of sepiolite at earth surface conditions. The Amer.Miner. V.53, 1645-1662.
- YALTON J.R. and WILSON M. (1976).- Pedogenic palygorskite in semi-aride broon (calciorthid) soil. Clay Minerals 11,73-80.