

Caractérisation minéralogique de certains sols salsodiques et planosoliques du « Chaco Deprimido » (Argentine)

Hector J. M. MORRAS (1), Michel ROBERT (2), Gérard BOCQUIER (3)

(1) INTA, Centro de Investigaciones de Recursos Naturales, 1712 Castelar (Argentine), stage à l'O.R.S.T.O.M. de 1976 à 1978

(2) Centre National de la Recherche Agronomique, Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (France)

(3) Université de Paris VII, 2, Place Jussieu, 75251 Paris Cedex 05 (France)

RÉSUMÉ

Formés à partir de différents sédiments loessiques quaternaires, des sols salsodiques et planosoliques du « Chaco Deprimido » présentent une composition minéralogique complexe de leur fraction argileuse. Celle-ci est liée d'une part aux héritages sédimentaires : kaolinite, illite et « minéraux gonflants » en proportions diverses selon l'origine du matériau parental. Et d'autre part aux évolutions pédologiques ultérieures : interstratifiés illite-smectite par transformation progressive des illites, néoformation de smectites, néoformation de palygorskite, évolution de tests de diatomées en produits amorphes de type allophanique, sinon en smectites. De plus le lessivage préférentiel des minéraux expansibles de petite taille interviendrait dans la différenciation minéralogique de ces profils.

ABSTRACT

MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF SOME SALSODIC AND PLANOSOLIC SOILS IN THE "CHACO DEPRIMIDO" (ARGENTINA)

Salsodic and planosolic soils in the "Chaco Deprimido" which are derived from different quaternary loess sediments get a clay part whose mineralogical composition is complex. On the one hand, it is related to inherited sediments such as kaolinite, illite and "swelling minerals" whose proportions vary with the origin of the parent material. On the other hand, it is related to the subsequent soil evolutions such as the interstratified illite-smectite through the gradual transformation of illites, the neoformation of smectites, the neoformation of palygorskite, and the evolution of diatom tests into allophanic amorphous materials, if not into smectites. Moreover, the preferential leaching of small expansible minerals would occur in the mineralogical differentiation of these profiles.

1. INTRODUCTION

La région du « Chaco Deprimido », également dénommée « Bajos Subméridionales », est située dans le nord de la Province de Santa Fé (Argentine). C'est une plaine basse, étendue et monotone, qui fait partie de la grande plaine sédimentaire chaco-pampéenne (fig. 1).

Cette unité morpho-pédologique d'extension Nord-Sud, est limitée à l'est et à l'ouest par deux dorsales surélevées, parallèles et allongées, qui sont vrai-

semblablement d'origine tectonique. Entre la dorsale occidentale et la plaine basse, on distingue aussi une zone topographiquement intermédiaire, où se produit un passage progressif entre deux écosystèmes. On doit remarquer toutefois le caractère excessivement plat de toute cette région, où la dénivellation entre la partie la plus élevée de la dorsale occidentale et la plus basse du « Chaco Deprimido » n'est que de 0,14 ‰.

Du fait des conditions géomorphologiques et climatiques, cette région du « Chaco Deprimido »

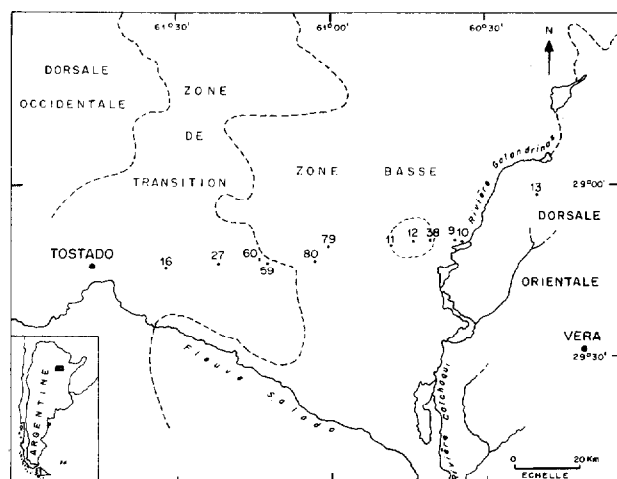


Fig. 1. — Localisation des profils étudiés dans la région du « Chaco Deprimido » (Argentine)

est périodiquement affectée par des inondations, alternant avec des périodes de sécheresse de durée variable. Par ailleurs, une nappe phréatique salée, présente à faible profondeur, constitue un facteur important de la dynamique hydrologique et des équilibres écologiques de cette région.

En rapport avec cette nappe saline sulfato-chlorurée sodique, des sols sodiques fortement salés se localisent dans la plaine basse, où la nappe est la plus proche de la surface (à environ 1 m de profondeur). Inversement, dans les reliefs surélevés (dans les dorsales, dans la zone de transition et dans certains reliefs surélevés de la zone basse) la salinité est plus faible, la proportion de bicarbonates alcalins augmente, alors que la sodicité des sols devient très variable. L'influence du modelé apparaît ainsi fondamentale dans la genèse et la différenciation des divers types de sols halomorphes, qui caractérisent cette région (CERANA, 1960 ; MORRÁS et PERMAN, 1977 ; MORRÁS, 1978, 1980).

Tous ces sols halomorphes se caractérisent aussi par une nette *différenciation texturale* entre les horizons A (A_1 et A_2) et l'horizon B. De même, les caractéristiques chimiques présentent — en plus des variations latérales déjà signalées — un fort contraste à l'intérieur d'un même profil : ainsi les horizons A sont généralement non sodiques et faiblement ou moyennement salés, tandis que les horizons B sont fortement sodiques et beaucoup plus salés.

En outre, la plupart des sols sont humifères, et caractérisés par un épipédon de type mollique. Les horizons B de leur côté présentent une *accumulation illuviale d'argile*, permettant de les considérer comme des horizons « natriques », ou, dans les rares

cas de faible sodicité, comme des horizons « argiliques ». De ce fait et d'après la nomenclature de la Soil Taxonomy (U.S.D.A., 1975), la plus grande partie des sols du « Chaco Deprimido » correspond à des Mollisols et à des Alfisols natriques (Natraquolls, Natrustolls, Natraqualls...).

Quant au matériau parental de ces sols, il est constitué par des *sédiments limoneux quaternaires*, caractéristiques de la plaine chaco-pampéenne. D'après FRENGUELLI (1925), on peut distinguer parmi ceux-ci les « loess primaires » (éoliens) et des « limons loessiques secondaires » (de même origine, mais redistribués par action de l'eau). Il est à noter que la composition minéralogique de ces sédiments se distingue de celle des autres loess de l'hémisphère nord, par un moindre contenu en quartz, et par la présence de feldspaths et de verres volcaniques acides en quantités variables, mais souvent importantes.

Bien que les caractéristiques morphologiques et minéralogiques des sédiments limoneux de toute cette région apparaissent assez constantes, il est possible de distinguer dans le nord de la Province de Santa Fé, plusieurs origines et modes de dépôt dans ces sédiments superficiels (D.Q.A.E., 1938 ; BERTOLDI de POMAR, 1969 ; MORRAS, 1978) :

Ainsi, dans la dorsale occidentale les matériaux présentent des caractères de limons éoliens originaires des Andes et des montagnes péri-pampéennes. Par contre, la composition des limons de la dorsale orientale révèle des apports supplémentaires en provenance du bassin du fleuve Parana : l'ensemble de ces matériaux ayant été probablement transporté par le vent, puis déposé en milieu palustre. Dans la zone basse (ou « Chaco Deprimido » au sens strict) les sédiments superficiels semblent être pour la plupart des « limons loessiques secondaires », avec des compositions plus ou moins intermédiaires.

En ce qui concerne la *minéralogie des argiles* des sols, on ne dispose pour le « Chaco Deprimido » d'aucune référence directe. Toutefois, quelques travaux ont déjà été réalisés sur des échantillons de régions voisines :

Ainsi, dans la dorsale orientale, DE PETRE et PEREZ RODRIGUEZ (1970) ont montré que dans les sols, l'illite est le minéral principal, accompagné par de petites quantités de montmorillonite et de kaolinite. Ces auteurs considèrent que l'illite est altérée, et qu'elle présente des propriétés de gonflement, mais ils indiquent que les minéraux interstratifiés sont absents.

D'autre part, dans la Province du Chaco, au nord du secteur du « Chaco Deprimido » étudié ici, GUEDES et PECORA (1966) ont signalé la présence d'illite et de montmorillonite, qui se présenteraient en partie comme des minéraux interstratifiés. Par

ailleurs, bien que la minéralogie des argiles des sols du bassin chaco-pampéen puisse être considérée, en première approche, comme assez homogène (SCOPPA, 1978), l'identification de certains minéraux constituant toujours présenté des difficultés (INIGUEZ, 1969 ; MORRÁS, 1979).

De ce fait, afin de préciser la nature des argiles présentes dans les sols du « Chaco Deprimido », on a réalisé l'analyse minéralogique d'échantillons provenant de divers profils de cette région. En même temps, et à travers l'étude de ces fractions argileuses, ce travail cherchait à mieux définir les caractères pédologiques, ainsi que les mécanismes de pédogenèse de ces sols halomorphes.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour cette étude minéralogique des fractions argileuses, on a travaillé sur un *transect* (fig. 1), qui comprend des sols de la zone de transition (profils 16, 27, 60 et 59), de la zone basse (profils 11, 12, 38, 79, 80), et de la dorsale orientale (profil 13). Dans la zone basse, on a distingué la plaine (profils 79 et 80) de certains reliefs légèrement surélevés, qui pourraient représenter des reliques d'une ancienne surface alluviale (profils 11, 12 et 38). A la limite entre la zone basse et la dorsale orientale, on a aussi distingué les bourrelets de berge (profil 10) et la plaine d'inondation du système fluvio-lacustre « Golondrinas » (profil 9). Mis à part les profils 38 (Argialboll) et 10 (Udifluent), tous les autres profils de sol ont été considérés comme des Mollisols ou des Alfisols natriques.

La fraction argile ($< 2 \mu$) de ces sols, préalablement traitée à l'eau oxygénée pour éliminer la matière organique, a été étudiée à l'aide d'analyses diffractométriques aux rayons X, d'analyses thermiques différentielles, et d'analyses en microscopie électronique.

Pour les analyses aux rayons X, on a utilisé deux diffractomètres (1) :

Avec le premier appareillage, on a obtenu des diagrammes de poudres d'échantillons saturés au magnésium, et des diagrammes d'échantillons magnésiens orientés, glycolés et chauffés à 500 °C. Avec

le deuxième diffractomètre on a analysé des échantillons magnésiens orientés, glycolés et, dans certains témoins, glycolés ; on a également étudié des échantillons saturés au potassium et chauffés à 200° et 450 °C. Certains échantillons ont été traités au citrate de sodium (ROBERT et TESSIER, 1974), afin d'éliminer d'éventuels composants interfoliaires ou des matériaux amorphes minéraux ou organiques. Une partie des argiles traitées a été saturée au magnésium et glycolée ; une autre, saturée au potassium et chauffée à 200° et 450 °C. Enfin, quelques échantillons ont été saturés au lithium, déposés sur une lame spéciale de silice opaque (BYSTROM BRUSEWITZ, 1975), puis chauffée à 500 °C et glycolés (test HOFMANN KLEEMEN).

Les analyses thermiques différentielles ont été réalisées sur des échantillons magnésiens, avec un appareil SETARAM micro ATD, à une vitesse de chauffage de 21 °C/min.

Pour les analyses microscopiques d'argiles magnésiennes, on a utilisé un microscope à transmission (JEOL-JEM 100 V), qui a permis l'identification morphologique et la réalisation de micro-diffractions électroniques. Enfin, des pâtes argileuses de certains échantillons ont été observées au microscope électronique à balayage (JEOL-JEM 32) à l'aide d'un dispositif CRYOSCAN.

3. RÉSULTATS OBTENUS

3.1. Les analyses aux rayons X

Ces analyses ont permis d'identifier les principaux composants de la fraction argile, et de mettre en évidence certaines variations minéralogiques aussi bien à l'intérieur de chaque profil, qu'entre les divers profils du transect.

(a) Variations minéralogiques « intraprofils »

Dans les horizons A, l'illite est le minéral argileux qui prédomine dans tous les profils. Des minéraux accessoires, tels que le quartz (réflexions principales à 4,25 et 3,34 Å) et les feldspaths (3,21 et 6,42 Å), sont nettement plus abondants dans les horizons superficiels et principalement dans les horizons A₂ (fig. 2).

(1) Le premier, un appareil SIGMA 80-CGR à distribution automatique des échantillons, dans les conditions suivantes : anticathode de Co, filtre de Fe, haute tension 45 Kv, intensité 10 mA, vitesse 1°20/min.

Le deuxième, un diffractomètre RIGAKU avec anticathode de Co, filtre de Fe, haute tension 30 Kv, intensité 10 mA, vitesse 1°20/min. Ces deux appareils ont été utilisés avec des modes différents d'enregistrement graphique : le premier dans le sens de la largeur de la bande de papier, le deuxième dans le sens de la longueur. De ce fait, le diffractomètre RIGAKU a permis un plus grand étalement des pics de diffraction et l'obtention de quelques renseignements supplémentaires.

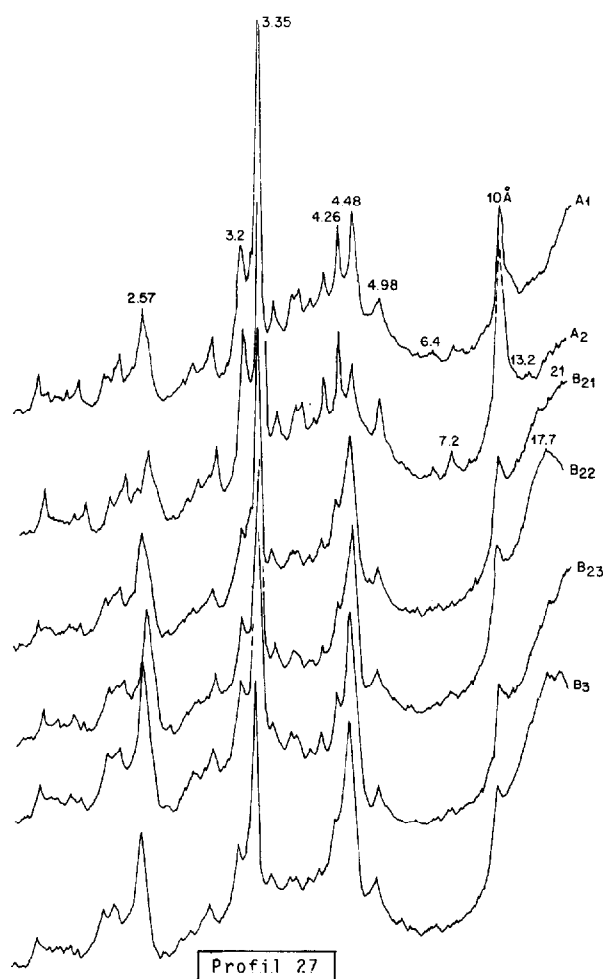


Fig. 2. — Diagrammes de poudres des argiles du Profil 27 (Appareil SIGMA 80 CGR)

La kaolinite pour sa part (réflexion à 7,18 Å), se présente en faible quantité aussi bien dans les horizons A que dans les horizons B ; toutefois, dans certains des profils étudiés, elle semble légèrement plus abondante dans les horizons A (fig. 2).

Dans les diagrammes de ces horizons A, apparaissent également quelques légères réflexions dans le domaine des petits angles (par exemple à 12,5 Å-14,5 Å-20 Å), qui pourraient être attribuées à la présence d'une faible proportion de minéraux *interstratifiés irréguliers*. Le traitement au glycérol de ces échantillons produit un léger déplacement des pics vers 18-22 Å, montrant ainsi le caractère *expansible* de certains feuillets de ces minéraux (fig. 3).

Dans les horizons B, la plus faible expression des réflexions à 10 Å-4,98 Å et 2,98 Å indique une forte

diminution de la proportion d'illite ; par ailleurs, et en particulier dans les diagrammes obtenus avec le diffractomètre RIGAKU, le pic à 10 Å devient plus asymétrique que dans les échantillons des horizons A, ce qui correspondrait à une augmentation du degré d'ouverture ou d'interstratification de ce minéral (fig. 4 et 7).

Cette plus faible proportion d'illite dans les horizons B s'accompagne d'une augmentation corrélative des réflexions dans la zone des petits angles (3° à $9^{\circ},20'$), qui indique la présence de minéraux 2 : 1 avec un certain écartement des feuillets. Par ailleurs, l'augmentation des argiles 2 : 1 dans ces horizons est aussi mise en évidence par la plus grande intensité de la réflexion à 4,48 Å correspondante aux plans 110 de ces minéraux (fig. 2).

Il est à noter que dans les diagrammes des argiles orientées obtenus avec le diffractomètre SIGMA 80, cette augmentation des réflexions se présente comme une « bosse » irrégulière avec des sommets entre 14,6 Å et 17 Å selon les échantillons (fig. 3, 5 et 6) ; par contre, dans les diagrammes de poudres obtenus avec le même appareillage et dans les diagrammes d'argiles orientées obtenus avec le diffractomètre RIGAKU, se dessine une « queue de réflexions » orientée vers les angles plus petits et constituée par plusieurs pics faibles, difficiles à distinguer du fond continu (probablement similaire à la « queue de diffusion » mentionnée par Mac EWAN et RUIZ AMIL (1973) (fig. 4 et 7).

Dans les échantillons orientés et glycérolés passés au diffractomètre SIGMA 80, il se produit un déplacement de leur pic maximal vers 18-22 Å, qui révèle la nature gonflante de ces minéraux. Dans les diagrammes obtenus avec le diffractomètre RIGAKU, on remarque que le gonflement des échantillons glycérolés ou glycolés est moins net que dans les analyses précédentes, et qu'il se manifeste par une accentuation modérée de la « queue de réflexions » vers les petits angles.

Le caractère en bosse ou en « queue de réflexions » des diagrammes diffractométriques aux petits angles, de par son aspect et sa variation selon les conditions expérimentales, pose certains problèmes d'interprétation. Toutefois et d'après les indications fournies par l'ensemble des données diffractométriques, on peut conclure que leur allure particulière est due à la présence de plusieurs réflexions successives correspondantes aux divers ordres de minéraux *interstratifiés irréguliers gonflants* ; par ailleurs, des réflexions sous-multiples de ces minéraux sont parfois observables vers 8-9 Å dans les échantillons orientés (fig. 6 et 7).

De plus, aux diverses réflexions d'interstratifiés s'ajoutent toujours quelques faibles réflexions plus typiques des *smectites* (14 Å, éch. normal ; 18 Å,

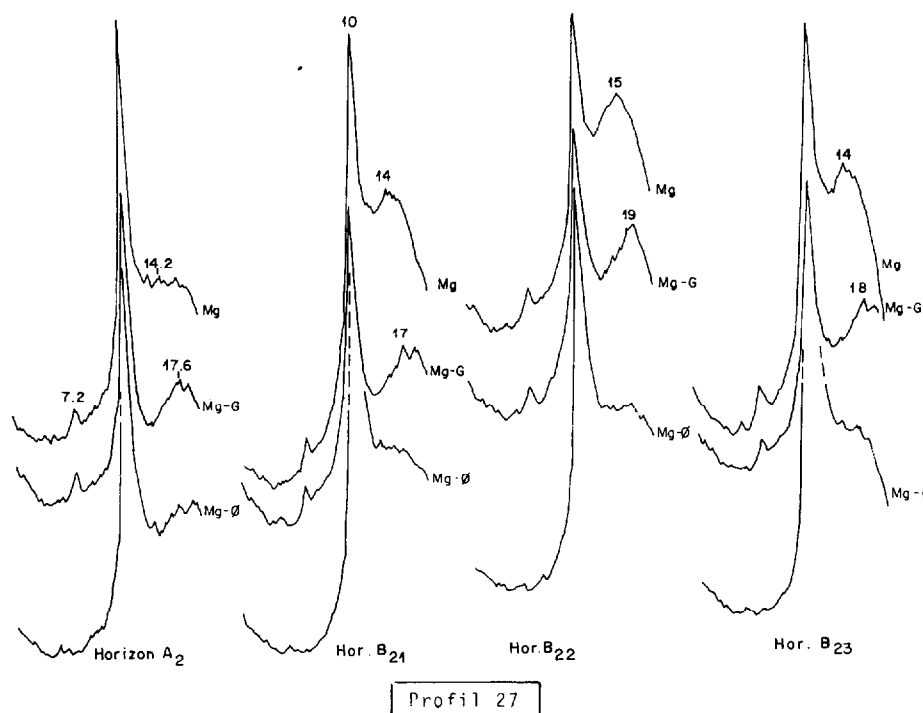


Fig. 3. — Diffractogrammes des argiles orientées du Profil 27 (Appareil SIGMA 80 CGR). Traitements — Mg : éch. magnésien; G : glycérolé; Ø : chauffé à 500 °C

éch. solvaté), ce qui confère à ces diagrammes une grande complexité. De ce fait, les diagrammes aux rayons X fournis par les argiles de ces sols apparaissent plus difficiles à analyser que ceux d'autres argiles interstratifiées, présentés dans la littérature (voir par exemple WEAVER, 1956).

Pour les mêmes raisons, les résultats du test HOFMANN KLEEMEN ont été parfois difficiles à interpréter. Toutefois, la présence d'une « queue de gonflement » vers les petits angles (après chauffage et traitement à l'éthylène glycol des échantillons saturés au lithium), conduit à envisager que les minéraux gonflants présents puissent être de nature *beidellitique* (fig. 4 et 7).

Le test de chauffage appliqué aux échantillons magnésiens à 500 °C, produit la fermeture des feuillets expansibles, ce qui est également visible par le plus fort développement du pic à 10 Å. Cependant, dans certains échantillons un palier de réflexions demeure dans le domaine des petits angles, ce qui laisserait supposer la présence de minéraux intergradés. Ce traitement fait par contre nettement disparaître le pic à 7,2 Å de la kaolinite, suggérant ainsi l'absence de chlorite vraie (fig. 3, 5 et 6).

On observe aussi que les échantillons potassiques chauffés à 450 °C se referment généralement vers 10 Å. Toutefois, dans certains de ces échantillons des réflexions subsistent entre 11 et 14 Å, ce qui semble indiquer un certain blocage des feuillets. Enfin, le traitement de ces argiles au citrate de sodium fait disparaître ces réflexions dans la plupart des cas, tandis que dans d'autres elles sont toujours visibles (fig. 4 et 7). La nature de la couche interfoliaire, qui semble exister dans certains échantillons, et qui conférerait un comportement de pseudo-chlorite, est donc encore un autre problème posé par ces analyses diffractométriques.

(b) Variations minéralogiques « interprofils »

En plus des variations verticales de la composition de la fraction argile, les analyses diffractométriques ont aussi permis de déceler le long du transect, certaines variations minéralogiques, qui seraient alors indépendantes du type de sol étudié.

En effet, dans les diagrammes des profils du secteur le plus occidental du transect (profils 16 à 79, fig. 1) le développement du pic à 10 Å de l'illite devient nettement supérieur à ceux des minéraux gonflants, ce qui montre une *prédominance* et probablement une *meilleure cristallinité de l'illite* (fig. 3).

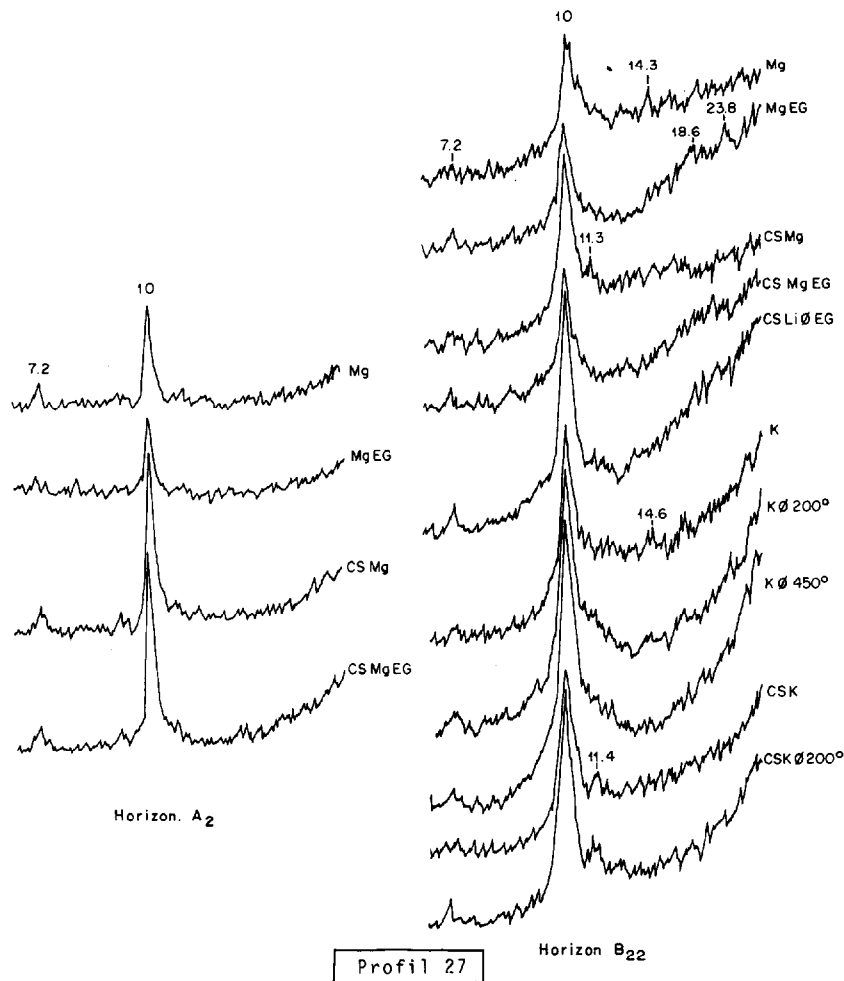


Fig. 4. — Diffractogrammes des argiles orientées du Profil 27 (Appareil RIGAKU). Références — Mg : échantillon magnésien ; EG : glycolé ; CS : traité au citrate de sodium ; Ø : chauffé ; Li : éch. saturé au Lithium ; K : éch. au potassium

Par contre, dans les échantillons provenant du relief situé dans la zone basse (profils 11, 12 et 38) les réflexions correspondantes aux minéraux gonflants sont aussi développées que celle de l'illite ; dans ces sols les *interstratifiés* et les *smectites* seraient donc *plus abondants* que dans les sols précédents (fig. 5).

Enfin, dans les profils du secteur alluvial du Golondrinas (profils 9 et 10), ainsi que dans la dorsale orientale (profil 13), on remarque le faible développement et l'assymétrie du pic à 10 Å de l'illite ; on note, par contre, la présence d'une série de réflexions irrégulières dans les petits angles, qui indiquerait dans ce secteur, la *prédominance des minéraux interstratifiés et des smectites* (fig. 6).

Cette variation latérale de la minéralogie des argiles des sols, s'accorde donc avec l'existence

de trois secteurs sédimentaires : l'un correspondant à la dorsale occidentale, un autre à la dorsale orientale, et enfin un secteur central intermédiaire dans la zone basse (MORRAS, 1978).

3.2. Les analyses thermiques différentielles

Les analyses thermiques différentielles ont permis d'obtenir certaines données complémentaires sur la composition minéralogique de la fraction argileuse des sols du « Chaco Deprimido » (fig. 8).

Dans le profil 27 (Natrustalf ou planosol solodique : F.A.O., 1974), situé dans la zone de transition, l'analyse thermique montre une nette différence entre les courbes des horizons A₁ et A₂, le crochet endothermique à 145 °C (eau d'hydratation) est

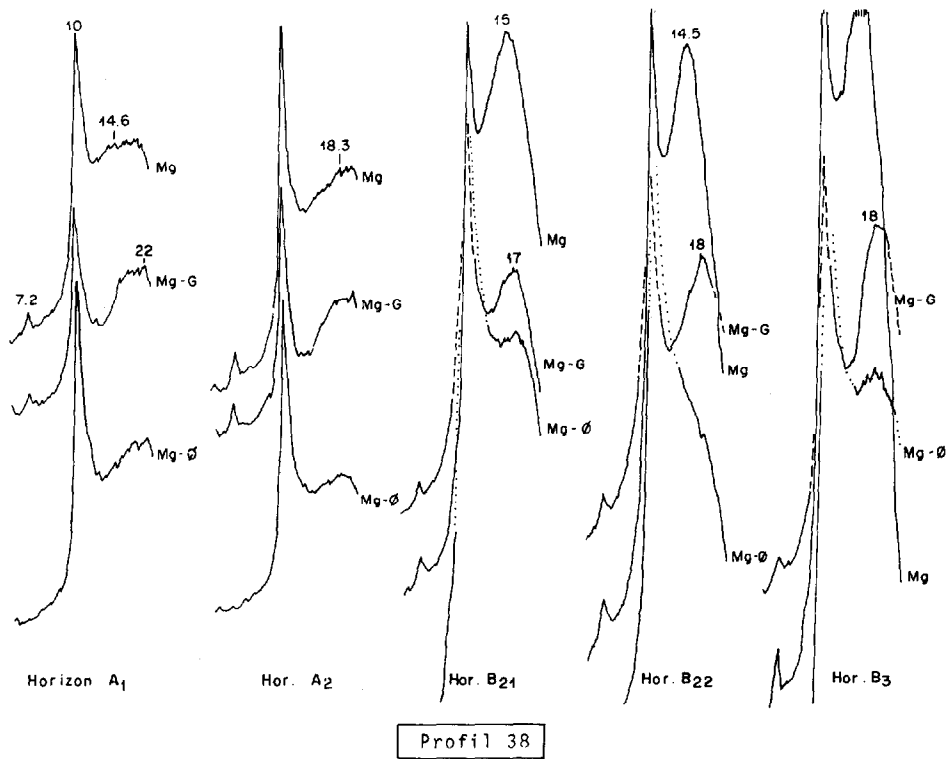


Fig. 5. — Diffractogrammes des argiles orientées du Profil 38 (Appareil SIGMA 80 CGR)

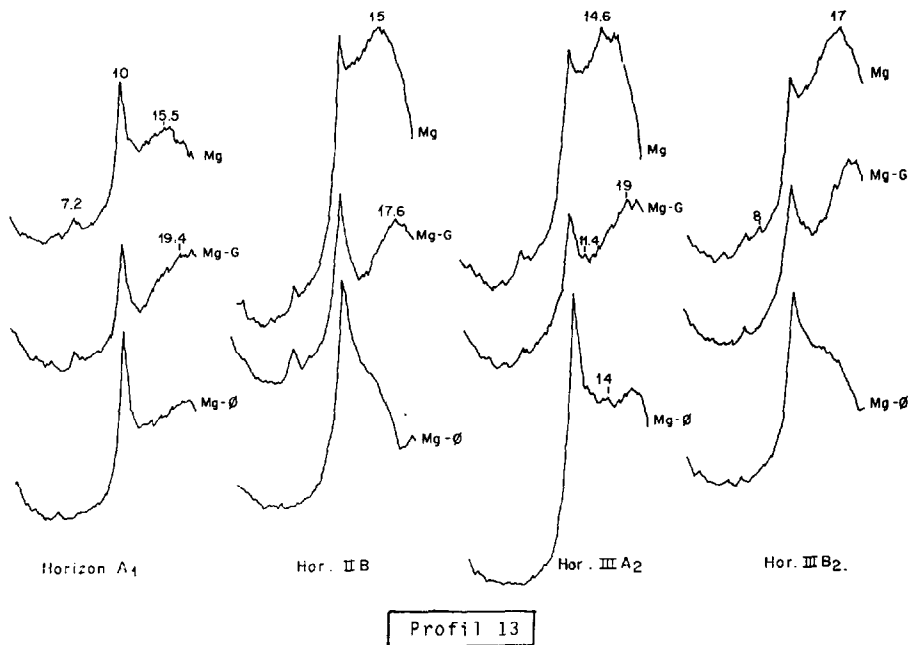


Fig. 6. — Diffractogrammes des argiles orientées du Profil 13 (Appareil SIGMA 80 CGR)

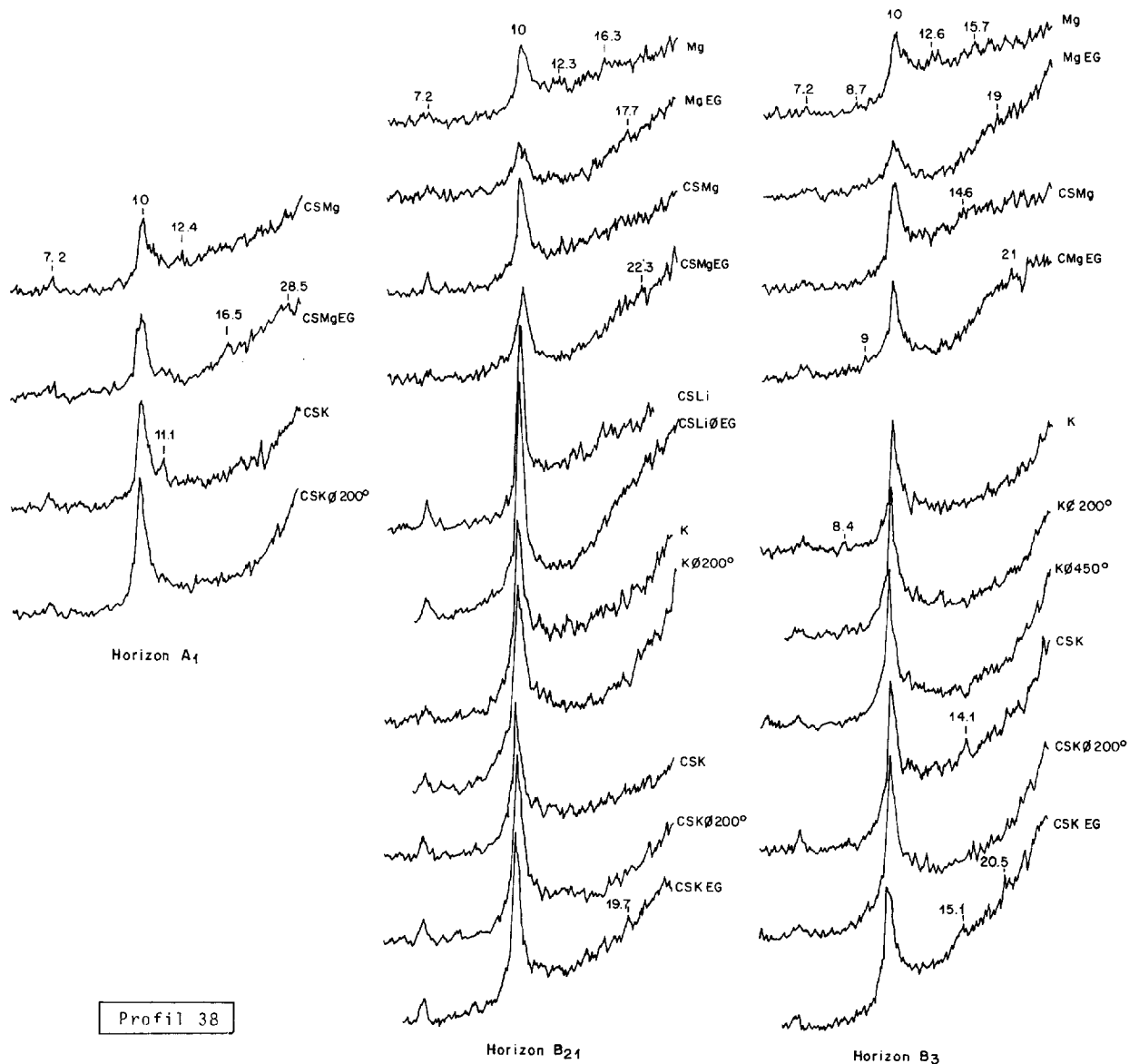


Fig. 7. — Diffractogrammes des argiles orientées du Profil 38 (Appareil RIGAKU)

relativement faible ; il en est de même pour le crochet de déshydroxylation à 570 °C ; le troisième crochet endothermique vers 900 °C, ainsi que l'exothermique à 950 °C, sont eux peu visibles. D'après les températures auxquelles s'effectuent les départs d'eau, ces courbes traduisent la présence de minéraux 2:1 de composition alumineuse, correspondant à l'*illite*, déjà mise en évidence par diffractométrie.

Dans les échantillons des horizons B, les pics enregistrés se produisent à des températures simi-

laire à celles des horizons précédents. Par contre, on remarque le plus fort développement de ces divers crochets. La surface du premier crochet endothermique, ainsi que la température de déshydratation, augmente dans les échantillons des horizons plus profonds (155 °C en B₂₁, 170 °C en B₃), ce qui indiquerait une *augmentation des minéraux hydralables* vers la base du profil. Le premier départ d'eau de constitution, vers 585-600 °C, est beaucoup plus marqué que dans les horizons A, de même que le couple endo-exothermique à 900-950 °C. Dans

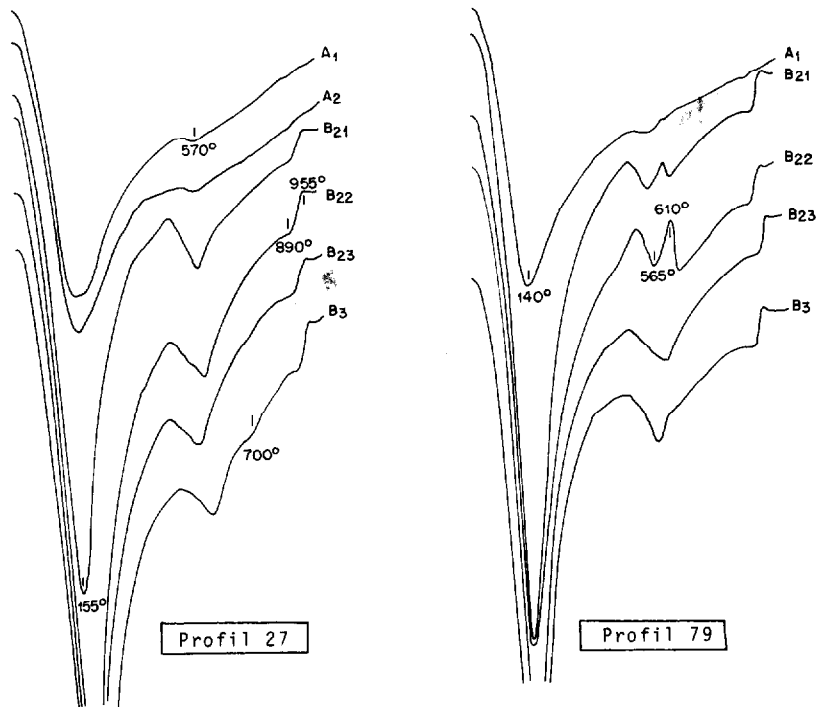


Fig. 8. — Analyses thermiques différentielles des argiles des Profils 27 et 79

l'horizon B₃ se manifeste également une légère inflexion endothermique vers 700 °C.

Ainsi, dans tout ce profil les températures de décomposition des argiles sont similaires. Cependant, le différent degré d'expression des courbes et en particulier le développement du premier crochet endothermique, ainsi que l'inflexion à 700 °C, montrent une certaine variation minéralogique au sein de ce profil. D'après MACKENZIE (1957) et BROWN (1961), des courbes similaires à celles des horizons B peuvent être produites par des « montmorillonites atypiques » ou par des minéraux interstratifiés. D'après MACKENZIE (1957), les beidellites présentent aussi leur premier pic de déshydroxylation vers 550 °C, avec parfois un autre crochet endothermique peu prononcé vers 700 °C.

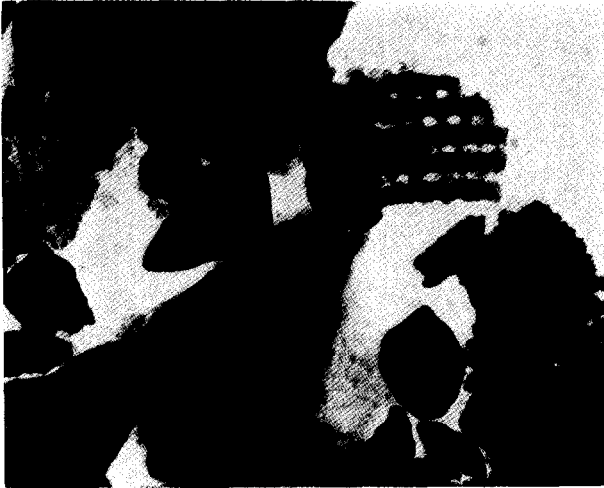
Bien que l'identification du type de smectite ne puisse être assurée par la seule analyse thermique différentielle, les résultats obtenus permettent cependant d'établir la présence d'une forte proportion de minéraux hydratables dans les horizons B ; étant donné leur température de décomposition, il est possible d'admettre que leur structure est similaire à celle des illites, il pourrait bien s'agir ainsi, au moins en partie, de *minéraux interstratifiés irréguliers* et de *nature beidellitique*.

Dans le *profil 79* (Natraquoll ou Solonetz mollique :

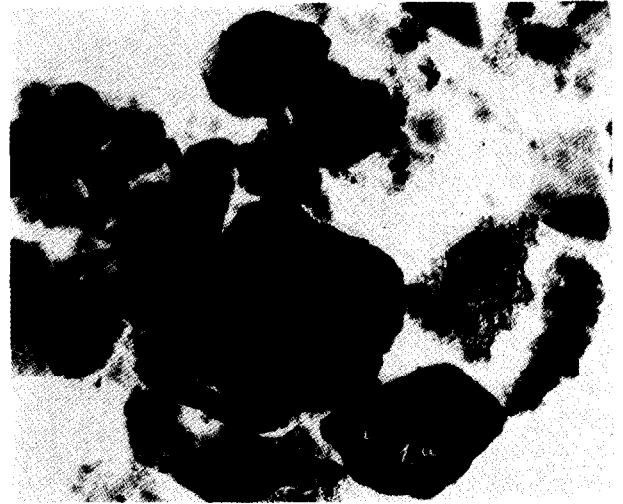
F.A.O., 1974), situé dans la zone basse, le diagramme thermique de l'horizon A₁ est similaire à celui des horizons A du profil précédent, et correspond à la présence de *illite*. Dans les horizons B, les crochets endothermiques dues à l'eau d'hydratation et l'eau de constitution augmentent fortement, comme pour le profil 27.

Par contre, à la différence du profil précédent, apparaissent dans les horizons B₂₁ et B₂₂ des crochets exothermiques entre 605° et 610 °C. La disparition de ces réactions exothermiques après des traitements répétés à l'eau oxygénée (de même qu'au citrate de sodium), permet de considérer qu'elles peuvent être dues à la présence de *matière organique* (MORRÁS, ROBERT, BOCCQUIER, 1980).

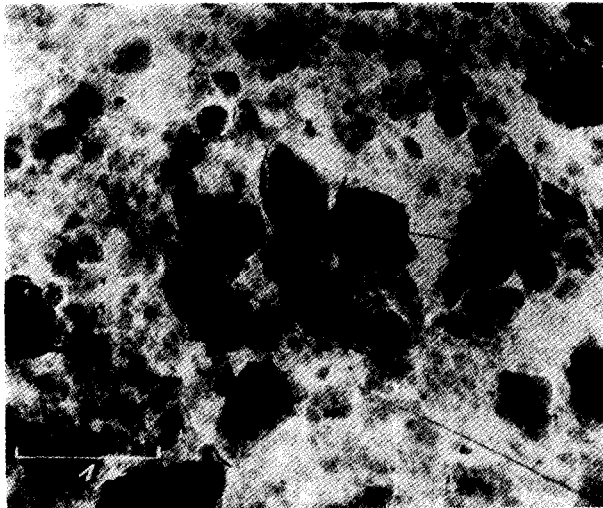
Des réactions thermiques similaires à celles-ci, et attribuées à de la matière organique, ont été également obtenues par KODAMA et SCHNITZER (1971) et par MOINEREAU (1975), mais sur des argiles de podzols et d'andosols. D'après ces auteurs, la température élevée à laquelle se produit la décomposition de ces substances organiques (probablement des acides fulviques) serait due au fait que ces substances sont localisées dans les espaces interfoliaires des argiles. Il est alors intéressant de constater, que dans le cas des Mollisols étudiés ici, cette association organo-minérale n'apparaît proba-



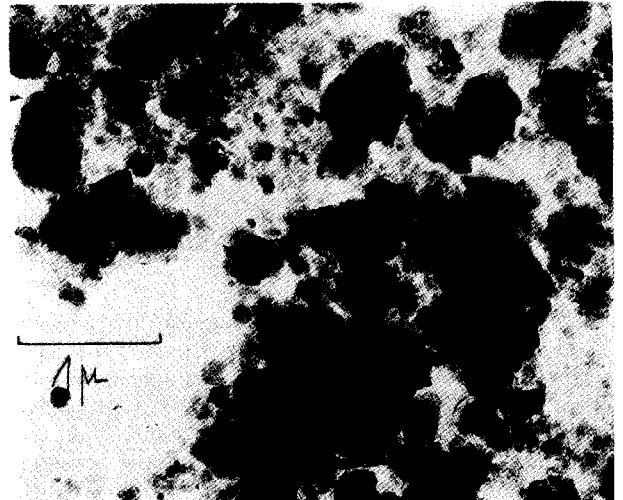
Phot. 1.



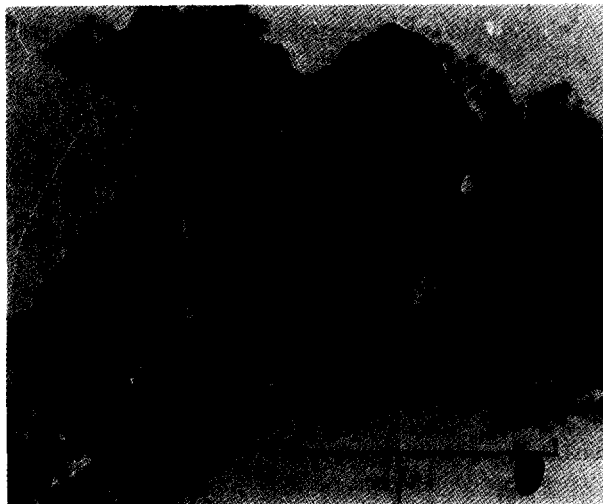
Phot. 2.



Phot. 3.



Phot. 4.



Phot. 5.



Phot. 6.

blement pas dans les horizons A₁, qui sont pourtant les plus humifères, mais qui ne renferment que très peu ou pas du tout d'argiles gonflantes.

Ainsi, ces résultats permettraient de confirmer le *pouvoir de gonflement* des argiles des horizons B de ces sols, ainsi que la possibilité de *pénétration de la matière organique* entre les feuillettes. D'autre part, ils rendraient compte également du *comportement de pseudochlorite*, qui a été constaté dans certains échantillons.

3.3. La microscopie électronique

Les caractérisations minéralogiques réalisées par diffraction des rayons X et par analyse thermique différentielle ont montré la complexité de la composition de la fraction argileuse de ces sols. On a donc cherché, par des observations microscopiques à préciser certaines caractéristiques de ces constituants et en particulier celles des minéraux expansibles. Il se trouve aussi, que les analyses microscopiques réalisées sur les constituants de ces sols, ont mis en évidence d'autres particularités qui, au départ, n'étaient pas soupçonnées.

(a) Caractéristiques et évolution des minéraux 2:1

En microscopie électronique, l'*illite* mise en évidence par les analyses précédentes, prédomine dans la fraction argileuse des horizons A. Au M.E.T., les cristaux d'*illite* apparaissent bien dispersés, avec des formes nettes, et présentent souvent le moiré caractéristique des minéraux micacés (pl. I, phot. 1, 2). Par ailleurs, en microscopie électronique à balayage (M.E.B.), l'organisation de ces particules semble bien être de type face-face, comme l'ont reconnu TESSIER (1975), et TESSIER et PEDRO (1976) (pl. II, phot. 1, 2).

Par contre, dans les échantillons des horizons B, on observe à côté des *illites* la présence relativement fréquente d'*argiles smectiliques*; celle-ci se présentent soit sous forme de particules plissées de forme irrégulière, soit comme des cristaux de petite taille, mal

délimités et formant une masse continue dans le fond de la préparation (pl. I, phot. 3, 4, 5).

Ces observations microscopiques fournissent un autre renseignement intéressant : elles montrent en effet, et plus particulièrement dans les échantillons des horizons B, que les bords de nombreux cristaux d'*illite* se replient et se courbent sur eux-mêmes (pl. I, phot. 3, 4, 5, 6 et pl. II, phot. 3, 4). Cette morphologie de bordure, déjà signalée par certains auteurs (RAMAN et JACKSON, 1964; KOUNESTRON, ROBERT, BERRIER, 1977), correspondrait à un mécanisme de *transformation des illites en minéraux interstratifiés*; il se produirait par remplacement du potassium interfoliaire par des cations plus hydratables, et conduirait ainsi à l'ouverture progressive des feuillettes.

On a aussi observé que dans certains grains d'*illite* aux bords plissés, des particules constituant la bordure semblent se détacher du grain originel. Il paraît ainsi vraisemblable que des petites particules plissées, probablement ouvertes et proches des *smectites*, puissent s'incorporer de cette façon à la fraction plus fine des argiles de ces sols.

Enfin, on peut signaler que dans le profil 13 de la dorsale orientale on a constaté un plissement assez généralisé de la bordure des particules d'*illite* (pl. I, phot. 4, 5), ces données microscopiques s'accordent ainsi avec les analyses aux rayons X, qui indiquent une importante proportion de minéraux interstratifiés dans la fraction argile de ce sol.

(b) Présence et évolution de tests de diatomées

Les analyses microscopiques de la fraction argileuse de ces sols ont aussi permis de mettre en évidence d'abondants *fragments de tests de diatomées* plus particulièrement dans les échantillons des horizons A (pl. I, phot. 1, pl. II, phot. 5 et III, 1). La microdiffraction électronique de ces frustules donne des diagrammes d'anneaux, révélant ainsi une distribution au hasard des unités structurales qui les composent.

PLANCHE I : Microscopie électronique à transmission de minéraux argileux des horizons A et B

Phot. 1. — Cristaux d'*illite* et fragments de tests de diatomées dans la fraction argile d'un horizon A (Profil 38, horizon A₁). Gross. 6 000 × (cf. fig. 5)

Phot. 2. — Cristaux d'*illite* et particules d'aspect « granulaire » (fragments de tests de diatomées) (Profil 38, horizon A₂). Gross. 10 000 × (cf. fig. 5)

Phot. 3. — Fraction argile d'un horizon B. On remarque la finesse des grains et la présence de particules d'*illite* aux bords repliés (Profil 27, horizon B₂₂). Gross. 15 000 × (cf. fig. 2, 3 et 4)

Phot. 4. — Aspect d'une argile à prédominance de minéraux interstratifiés et *smectitiques* (Profil 13, horizon 111B₂). Gross. 20 000 × (cf. fig. 6)

Phot. 5. — *Idem* photo précédente; on note le plissement des bords (Profil 13, horizon 111 B₂). Gross. 30 000 ×

Phot. 6. — Cristal d'*illite* avec une extrémité repliée (Profil 16, horizon B₁). Gross. 15 000 ×



Phot. 1.



Phot. 2.



Phot. 3.



Phot. 4.



Phot. 5.

Ces corps d'origine biologique subissent à l'évidence une fragmentation progressive qui peut même être constatée dans la fraction argileuse. Dans la planche III, photo 1, on observe qu'à partir d'un fragment de test de diatomée se détachent des microfragments, qui se mélangent, et même se confondent aux minéraux argileux. On note également que ces fragments de taille différente présentent tous une structure contrastée d'aspect « granulaire », pouvant être l'indice d'un début d'altération (pl. I, phot. 2 et probablement aussi pl. II, phot. 5).

En outre, et surtout dans les échantillons des horizons A, on observe fréquemment certaines particules, dont la morphologie est originale. Celles-ci, de forme plus ou moins régulière, montrent une structure « glomérulaire » constituée par de petites *sphérules intimement associées*, et formant une trame apparemment poreuse. De nombreuses observations au M.E.T. permettent de rattacher ces particules aux fragments de diatomées signalées précédemment (pl. III, phot. 2).

Enfin, dans la fraction argileuse de ces sols, on rencontre aussi mais plus rarement, de petites particules sphériques enchaînées ou associées en grappes, et ressemblant à certains *produits amorphes* décrits par d'autres auteurs (MITCHELL *et al.*, 1964 ; SINGER, 1974) (pl. III, phot. 3, 4, 5). Toutefois, du fait des similitudes morphologiques entre ces particules en « grappes » et les particules « glomérulaires », il paraît fort probable que les premières représentent un stade avancé d'évolution des frustules de diatomées.

Il semble ainsi possible de proposer une relation de filiation entre toutes ces particules, comme le suggère la planche III, photos 1, 2 et 3, qui représenteraient une séquence morphologique de leur évolution. Néanmoins, il n'est pas possible d'établir si les termes ultimes de cette évolution correspondent à un simple processus de dissolution ou d'altération de la structure siliceuse originelle, ou bien s'il s'agit d'une évolution plus complexe avec la participation d'autres éléments chimiques du milieu pour aboutir à l'organisation de *matériaux de type allophanique*.

Néanmoins, dans d'autres cas, des morceaux de frustules semblent participer effectivement à l'organisation de minéraux argileux de structure plus ordonnée. En effet, sur les bords des cavités internes et même sur les bords externes de certains morceaux de frustule, on observe de petites particules, qui ont les caractères morphologiques des *smectites* (pl. III, phot. 6). Un tel processus de néogenèse présenterait alors des analogies avec celui de la formation de certaines glauconies (ODIN, 1975).

Bien que la formation de minéraux argileux à partir de la silice de diatomées n'ait pas encore été mise en évidence dans le milieu pédologique, plusieurs travaux ont déjà signalé cette possibilité d'évolution dans des sédiments marins (CHAMLEY et MILLOT, 1972 ; VAN BENNEKEM et VAN DER GAAST, 1976 ; JOHNSON, 1976). Par ailleurs, il a été aussi remarqué que des particules de smectite vraisemblablement authigènes se localisaient préférentiellement à l'intérieur de cavités naturelles de ces microfossiles siliceux ; une telle *néoformation* se ferait concurremment ou subséquemment à la dissolution de la silice des frustules : la source des autres éléments nécessaires pouvant se trouver dans les verres volcaniques ou dans les autres minéraux du milieu.

De ce fait, et en tenant compte de l'environnement physico-chimique de ces sols halomorphes généralement riches en bases et où sont même présents des verres volcaniques, l'existence d'un processus de synthèse de smectites à partir de ces structures biologiques paraît fort probable.

(c) *Présence et origine de minéraux argileux fibreux*

En confirmant l'intérêt de son utilisation comme méthode analytique pour l'étude des argiles de ces sols, la microscopie électronique a également permis de reconnaître la présence d'argiles fibreuses (pl. IV, phot. 1) ; ces minéraux sont donc décelés pour la première fois dans les sols de la région chaco-pampéenne (MORRÁS, ROBERT, BOCQUIER, 1981).

En effet, dans les horizons B des profils 27 et 79, on a observé une faible quantité de ces minéraux fibreux (*palygorskite* ou *sépiolite*), qui n'avaient

PLANCHE II : Microscopie électronique à balayage de minéraux argileux

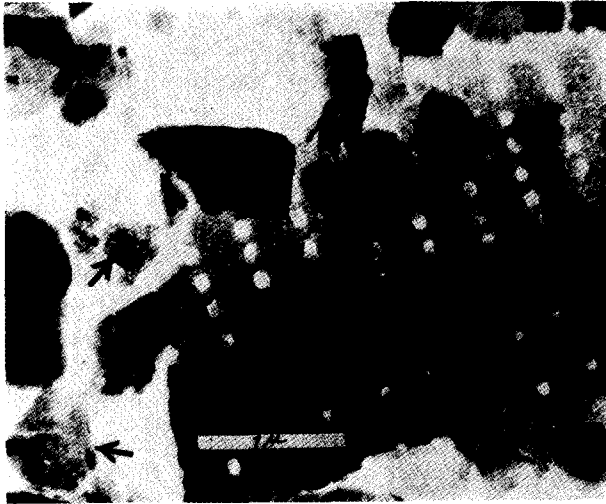
Phot. 1. — Aspect rigide des argiles micacées d'un horizon A (Profil 27, horizon A₂). Gross. 4 800 ×

Phot. 2. — Détail de l'échantillon précédent. Arrangement face-face des particules d'illite. Gross. 15 000 ×

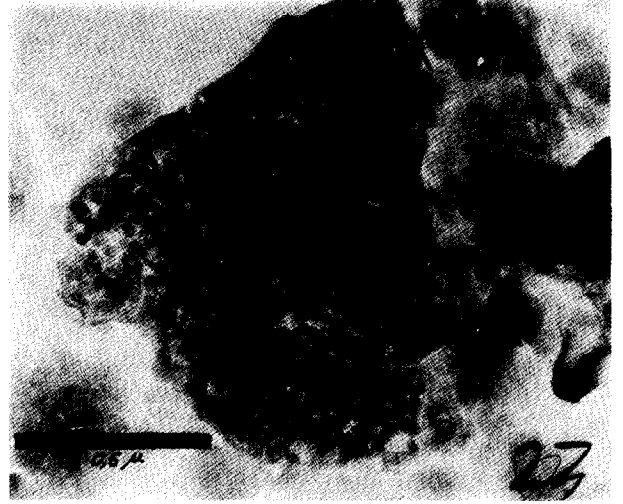
Phot. 3. — Particules d'argile tordues et aux bords repliés (Profil 13, horizon A₁). Gross. 32 000 ×

Phot. 4. — Particule d'argile micacée aux bords entièrement repliés (Profil 16, horizon B₁). Gross. 65 000 ×

Phot. 5. — Présence de particules d'illite, de minéraux primaires, de fragments de frustules de diatomées, et d'une particule « altérée » (Profil 27, horizon A₂). Gross. 20 000 ×



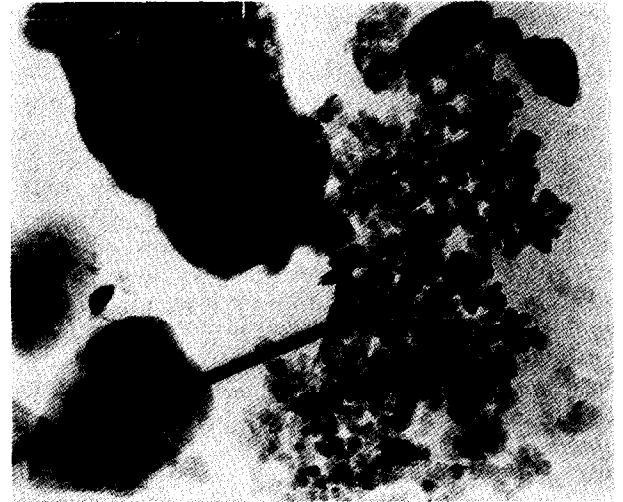
Phot. 1.



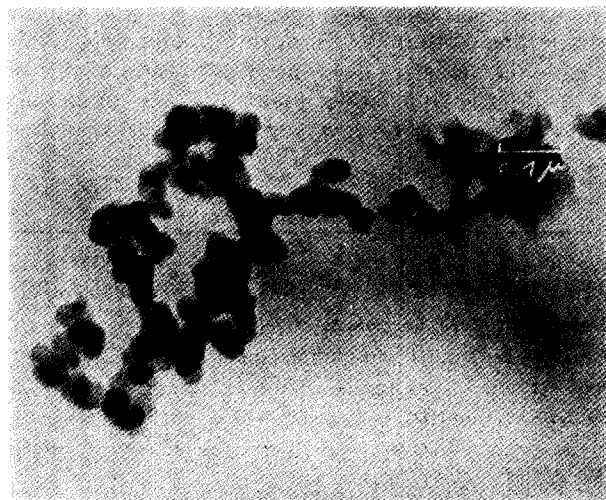
Phot. 2.



Phot. 3.



Phot. 4.



Phot. 5.



Phot. 6.

pas pu être mis en évidence par les seules analyses aux rayons X. Par ailleurs, ces argiles ne se présentent pas uniformément distribuées dans tout l'échantillon concerné, mais elles se localisent en de rares petits amas de quelques fibres.

En outre, l'observation des limons fins (2-20 μ) de ces sols au M.E.T. et au M.E.B., a montré que certaines particules de cette dimension se trouvent véritablement enrobées d'argiles fibreuses (pl. IV, phot. 2, 4, 5). Du fait de leur morphologie au M.E.B., et de l'analogie avec les données de YAALON et WIEDER (1976), il paraît probable que ces particules sont des petits grains de carbonate, qui constitueraient ainsi un support favorable pour la genèse de ces argiles.

On a observé ainsi, sur la surface d'un de ces grains de limon, la présence d'une longue fibre de ces minéraux (pl. IV, phot. 2, 3). Il est alors très intéressant de constater que cette fibre est en contact avec deux des particules en « grappes » (siliceuses ou allophaniques) mentionnées précédemment, et à partir desquelles elle semble prendre naissance.

De ce fait, compte tenu des caractéristiques et de la localisation particulière de ces minéraux fibreux, ainsi que des conditions physico-chimiques qui règnent dans ces sols, il semble possible d'attribuer à ces argiles une *origine pédogénétique* (MILLOT, PAQUET, RUELLAN, 1969). A ce propos, le milieu confiné qui caractérise la plupart des sols de cette région, la forte salinité, et la richesse du milieu en silice libre (comme le confirme l'abondance des phytolites et des diatomées), seraient autant de facteurs qui, d'après les données de la littérature (SINGER et NORRISH, 1974 ; GORBUNOV et SCHURINA, 1976), pourraient favoriser la néoformation de ces argiles fibreuses.

4. CONCLUSIONS

D'un point de vue minéralogique, les différents tests et techniques analytiques mises en œuvre dans tous les sols étudiés du « Chaco Deprimido », montrent donc la présence de trois types principaux de minéraux argileux : la kaolinite, l'illite et les « minéraux gonflants ».

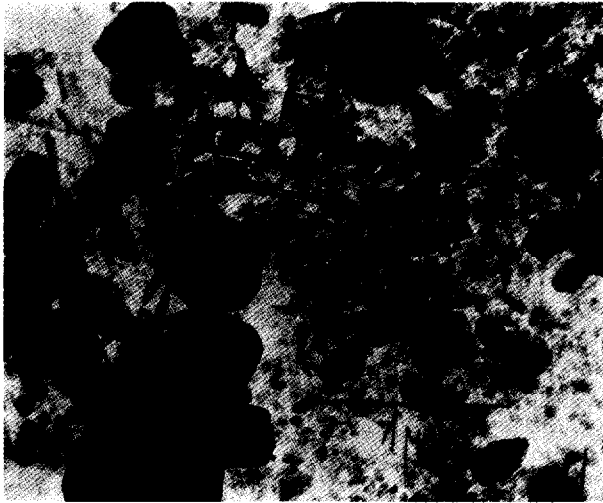
La *kaolinite* se trouve toujours en faible quantité et, bien qu'elle subisse peu de variations le long des profils, elle semble parfois légèrement plus abondante dans les horizons A de certains profils.

L'*illite* pour sa part, peut être considérée dans tous les sols comme le minéral de « base », et même comme le minéral « de départ ». Elle est plus abondante et sa structure semble mieux conservée dans les horizons A. Néanmoins, une certaine assymétrie des pics à 10 Å indiquerait déjà dans ces horizons un début d'ouverture ou de « dilatation périphérique » (TRIBUTH, 1976). Dans les horizons B, l'illite diminue en quantité et son degré d'ouverture paraît être plus accentué. Par ailleurs, certains profils (en particulier le profil 13 de la dorsale orientale) se caractérisent par la présence de pics à 10 Å très larges et assymétriques ; dans ces sols, l'illite se trouverait surtout à l'état d'« illite ouverte ».

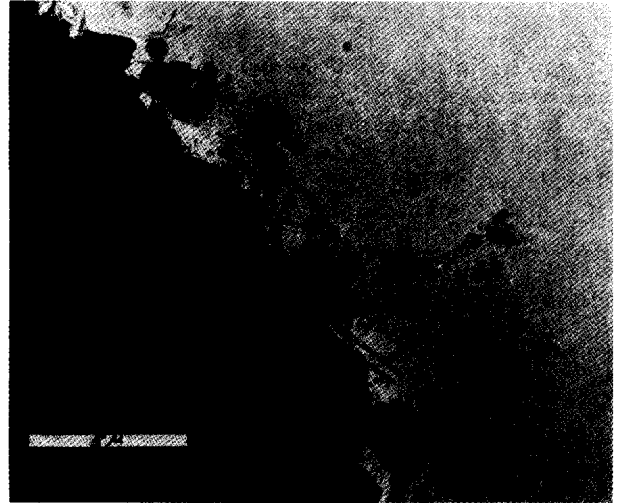
Le troisième type de minéraux présents, et qu'on a englobé sous la dénomination de « minéraux gonflants », est celui qui pose les plus grands problèmes d'identification. Ce groupe d'argiles gonflantes, qu'on considère comme le plus caractéristique des minéraux secondaires de ces sols, serait composé par un ensemble de minéraux différents. Une proportion importante correspondrait à des *argiles interstratifiées irrégulières* du type illite-smectite. Par ailleurs des smectites plus typiques ont aussi été décelées dans tous ces sols. Comme on a pu le constater, les minéraux gonflants sont toujours plus abondants

PLANCHE III : Évolution des frustules de diatomées dans la fraction argileuse

- Phot. 1. — Test de diatomée et morceaux détachés se confondant avec les argiles minéralogiques (cf. photo 1.2) (Profil 27, horizon A₂). M.E.T. Gross. 15 000 × (le trait blanc représente 1 μ)
- Phot. 2. — Fragment de test de diatomée en cours d'alération, présentant un aspect « glomérulaire » (Profil 11, horizon B_{2a}). M.E.T. Gross. 40 000 × (le trait représente 0,5 μ)
- Phot. 3. — Particules en « grappes », pouvant correspondre à une étape avancée d'évolution des tests de diatomées (Profil 79, horizon B_{2a}). M.E.T. Gross. 15 000 × (le trait représente 1 μ)
- Phot. 4. — *Idem* figure précédente (Profil 16, horizon B₁). M.E.T. Gross. 20 000 ×
- Phot. 5. — *Idem* figure précédente ; on remarque la similitude de cette structure avec celle des matériaux allophaniques (Profil 27, horizon A₂). M.E.T. Gross. 60 000 ×
- Phot. 6. — Morceau de test de diatomée, où l'on observe des structures analogues à celles de petits cristaux d'argile smectitique (Profil 27, horizon A₂). M.E.T. Gross. 40 000 × (le trait représente 0,5 μ)



Phot. 1.



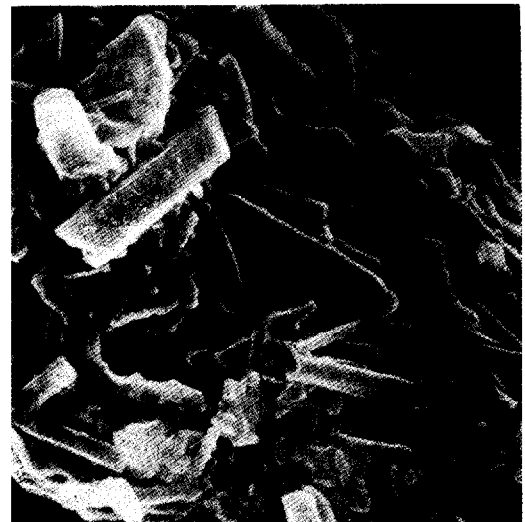
Phot. 2.



Phot. 3.



Phot. 4.



Phot. 5.

dans les horizons B. Le test HOFFMANN KLEEMEN pourrait indiquer leur nature beidellitique, tandis que les analyses thermiques montraient une analogie de structure et de composition de ces minéraux avec celles de l'illite.

Les analyses diffractométriques ont suggéré dans quelques échantillons la présence de minéraux intergrades ou « pseudochlorites ». Sans exclure tout à fait cette possibilité, il semblerait plutôt que le comportement observé dans ces argiles soit dû à la présence de *produits organiques en position interfoliaire*.

D'après les données obtenues en microscopie électronique, et d'après la nature des minéraux gonflants précisés par les déterminations diffractométriques et thermiques, il semble possible d'établir que dans ces sols l'évolution des argiles correspond principalement à un *processus de transformation*. Cette évolution, qui se ferait par dilatation progressive des espaces interfoliaires des illites, aboutirait aux smectites, en passant par l'étape de minéraux interstratifiés illite-smectite.

Bien que dans ces sols les processus de transformation semblent de loin les plus importants, certaines données — en particulier morphologiques — indiqueraient également l'existence de *néoformations minéralogiques*. Celles-ci concernent la néoformation de *minéraux fibreux*, et vraisemblablement aussi la genèse de *smectites*.

Enfin, associées à des fragments de diatomées, d'autres particules, qui semblent en dériver, sont également présentes mais en faible proportion, dans ces fractions argileuses. Bien que leur composition n'ait pas pu être précisée, la morphologie de certaines de ces particules est similaire à celle décrite pour des *matériaux amorphes de type allophanique*.

— *D'un point de vue pédogénétique*, la différenciation minéralogique des profils, étroitement liée à la morphologie contrastée entre les horizons A et B de tous ces sols, peut résulter de divers processus :

D'après les travaux réalisés pour d'autres sols

analogues de type salsodique (PAQUET, BOCQUIER, MILLOT; 1966. DUCHAUFOUR, 1977) et planosolique (DUDAL, 1973; MORRÁS, 1979), on pourrait envisager que cette différenciation résulte de l'altération de certains minéraux argileux dans les horizons A. Toutefois, on n'a pas obtenu jusqu'ici de données, qui puissent confirmer cette éventuelle *dégradation des minéraux phylliteux*. Par ailleurs, on doit rappeler que le pH des horizons superficiels de ces sols est en général neutre ou légèrement alcalin, même dans les horizons A₂ des sols planosoliques; cela ne semblerait donc pas compatible avec des processus d'altération de minéraux argileux faisant intervenir l'activité des ions H⁺ adsorbés, comme on l'admet généralement pour les mécanismes de solodisation (GEDROITS, 1926) ou de ferrollyse (BRINKMAN, 1970).

Par contre, certaines données semblent indiquer que cette différenciation minéralogique correspondrait, au moins en partie, à des *processus de lessivage*. D'après les observations en microscopie électronique, la taille moyenne des particules argileuses des horizons B est nettement inférieure à celle des horizons A. Cela s'accorde avec d'autres travaux qui précisent que l'argile fine, riche en smectites, augmente dans les horizons B des Mollisols de la région pampéenne (SCOPPA, 1978). De ce fait, étant donné que les petites particules peuvent être entraînées plus facilement dans le profil (SMITH et WILDING, 1972), on peut considérer que la différenciation minéralogique pourrait être due au lessivage préférentiel des minéraux expansibles de petite taille; ce transfert peut intervenir aussi bien sur les petites particules déjà présentes dans le matériau de départ, que sur celles d'origine pédogénétique par transformation des cristaux d'illite. Par ailleurs, dans ces sols halomorphes du « Chaco Deprimido », la peptisation et le lessivage des argiles seraient facilités par la forte proportion de sodium adsorbé.

Néanmoins, et bien que le lessivage d'argiles expansibles puisse être prédominant, d'autres processus semblent jouer aussi un certain rôle. Ainsi, un enrichissement *in situ* en minéraux gonflants

PLANCHE IV : Microscopie électronique des minéraux argileux fibreux

Phot. 1. — Minéraux fibreux dans la fraction argileuse (Profil 79, horizon B₃). M.E.T. Gross. 20 000 ×

Phot. 2. — Grain de la taille d'un limon, enrobé d'argiles fibreuses. On remarque aussi une longue fibre associée à des petites particules en « grappes » (Profil 27, horizon B₂₂). M.E.T. Gross. 1 000 × (le trait blanc représente 2 μ)

Phot. 3. — Détail de la photo précédente. La fibre semble naître des particules amorphes en « grappes ». M.E.T. Gross. 30 000 × (le trait représente 0,5 μ)

Phot. 4. — Grain de la taille d'un limon, avec des petites baguettes à sa surface (Profil 79, horizon B₃). M.E.B. Gross. 4 800 ×

Phot. 5. — Détail de la photo précédente. M.E.B. Gross. 18 000 ×

peut se produire dans les horizons B par suite des conditions physico-chimiques plus favorables aux transformations des illites en minéraux interstratifiés (BOCQUIER, 1973). De même, et comme semblent le prouver les données concernant la genèse de minéraux fibreux et l'évolution des diatomées, une néoformation plus intense d'argiles gonflantes dans les horizons B pourrait être aussi partiellement responsable de la différenciation minéralogique constatée.

— Enfin, et d'un point de vue sédimentologique, bien qu'on ait observé quelques variations minéralogiques entre les différents profils étudiés (prédominance de l'illite vers l'ouest et des « minéraux gonflants » vers l'est du transect), celles-ci ne correspondent pas à des différences de caractères et de définitions taxonomiques des sols, mais plutôt à

l'existence de matériaux parentaux d'origine différente. Ainsi, la relation générale mise en évidence dans cette région entre la composition de la fraction argileuse et les différents secteurs sédimentaires, constitue un autre fait intéressant, contrastant avec l'apparente uniformité et la monotonie, qui semblaient caractériser les argiles de ces sédiments loessiques quaternaires du bassin chaco-pampéen.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M. et le Centre National de la Recherche Agronomique de leur collaboration pour l'obtention des données analytiques.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 15 février 1982.

BIBLIOGRAPHIE

- BERTOLDI DE POMAR (H.), 1969. — Notas preliminares sobre la distribución de minerales edafógenos en la Provincia de Santa Fe. *In: Actas, V Reun. Arg. Cien. Suelo*: 716-726.
- BOCQUIER (G.), 1973. — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. *Mémoire O.R.S.T.O.M.*, 62, 350 p.
- BRINKMAN (R.), 1970. — Ferrolysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma*, 3 : 199-206.
- BROWN (G.), 1961. — The X-ray identification and crystal structure of clay minerals. Mineralogical Society, London, 544 p.
- BYSTROM BRUSEWITZ (A.), 1975. Studies of the lithium test to distinguish between beidellite and montmorillonite. *In: Proc. Intern. Clay Conference. Mexico. Applied Publishing Ltd., Illinois* : 419-428.
- CERANA (L.), 1960. — Suelos de la fracción norte de los Bajos Submeridionales de la Provincia de Santa Fe. *IDIA, Supl. I* : 180-183.
- CHAMLEY (H.), MILLOT (G.), 1972. — Néoformation de montmorillonite à partir de diatomées et de cendres dans les sédiments marins de Santorin (Méditerranée occidentale). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 274 : 1132-1134.
- DE PETRE (A.), PEREZ RODRIGUEZ (J.), 1970. — Estudio roentgenografico difractometrico y termico diferencial de perfiles de suelo del norte de la Provincia de Santa Fe. *Rev. Invest. Agrop.*, Sér. 3, vol. III, 2 : 105-125.
- D.Q.A.E. (Dirección de Química Agrícola y Edafología-Min. Agric. Ganad. Prov. Santa Fe), 1938. — Organización y actividades : 28-49.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1977. — Pédologie 1 : Pédogenèse et Classification. Masson & C^{ie}, Paris, 447 p.
- DUDAL (R.), 1973. — Planosols. *In: Pseudogley & Gley. Schlichting and Schwertman, éd. Verlag Chemie* : 275-285.
- FAO-UNESCO, 1974. — Soil map of the world. Vol. 1, Legend. UNESCO, Paris, 59 p.
- FRENGUELLI (J.), 1925. — Loess y limos pampeanos. *GAEA (Anal. Soc. Arg. Est. Geograficos)*, Vol. 1 : 1-88.
- GEDROITS (K.), 1926. — Solodisation of soils (en russe). *Nozovskaya sel' skokhoz. opyt. stantsiya. Novoska*.
- GORBUNOV (I.), SCHURINA (G.), 1976. — (Extension et conditions de formation de la palygorskite et de la sépiolite dans les sols gris désertiques et les takyrs) (en russe). *Pochvovedenie*, 4 : 133-139.
- GUEDES (O.), PECORA (E.), 1966. — Caracterización de los minerales de arcilla de tres perfiles de suelos de la región chaqueña. *Rev. Invest. Agrop.*, Sér. 3, Vol. III, 1 : 1-16.
- IÑIGUEZ (A.), 1969. — Los minerales de arcillas interstratificados. Su importancia en los procesos edáficos. *In: Actas V Reun. Arg. Cien. Suelo* : 655-658.
- JOHNSON (T.), 1976. — Biogenic opal preservation in pelagic sediments of a small area in the eastern tropical Pacific. *Geol. Soc. of Am. Bull.*, Vol. 87 : 1273-1282.
- KODAMA (II.), SCHNITZER (M.), 1971. — Evidence for interlamellar adsorption of organic matter by clay in a podzol soil. *Can. J. Soil Sci.*, 51 : 509-512.
- KOUNESTRON (O.), ROBERT (M.), BERRIER (J.), 1977. — Nouvel aspect de la formation des smectites dans les vertisols. *C.R. Acad. Se. Paris*, t. 284 : 733-736.
- Mc EWAN (D.), RUIZ AMIL (A.), 1973. — Interstratificación de tipo illítico en minerales de arcilla. *Anal. Edaf. Agrobiol*, Vol. XXXII, 1-2 : 109-122.

- MACKENZIE (R.), 1957. — The differential thermal investigation of clay. Mineralogical Society, London, 456 p.
- MILLOT (G.), PAQUET (H.), RUELLAN (A.), 1969. — Néoformation de l'attapulgite dans les sols à carapaces calcaires de la Basse Moulouya (Maroc oriental). *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 268 : 2771-2774.
- MITCHELL (B.), FARMER (V.), Mc HARDY (W.), 1964. — Amorphous inorganic materials in soils. *Adv. in Agronomy*, Vol. 16 : 327-383.
- MOINEREAU (J.), 1975. — Andosols, sols podzolisés, sols andiques et sols bruns. Séquence sur matériaux basaltiques dans le Velay oriental et le Vivarais (Massif Central, France). *Science du Sol*, 4 : 295-314.
- MORRÁS (H.), PERMAN (S.), 1977. — Características pedológicas y utilización de algunos suelos halomórficos de los Bajos Submeridionales, Argentina. *Turrialba*, Vol. 27, 4 : 397-403.
- MORRÁS (H.), 1978. — Contribution à la connaissance pédologique des Bajos Subméridionales (Province de Santa Fé, Argentine). Influence de l'environnement sur la formation et l'évolution des sols halomorphes. Thèse Dr. Ing., Université Paris VII, 184 p.
- MORRÁS (H.), 1979. — Quelques éléments de discussion sur les mécanismes de pédogenèse des planosols et d'autres sols apparentés. *Science du Sol*, 1 : 57-66.
- MORRÁS (H.), 1979. — Consideraciones sobre la identificación de minerales interstratificados de arcilla de suelos argentinos. *Bol. Asoc. Arg. Cien. Suelo*, 37 : 12-17.
- MORRÁS (H.), 1980. — Evaluación de las características pedoquímicas de una transecta de suelos en los Bajos Submeridionales (Santa Fe). In: IX Reun. Arg. Cien. Suelo, Paraná, Vol. III : 965-977.
- MORRÁS (H.), ROBERT (M.), BOCQUIER (G.), 1980. — Possible localización interfoliar de compuestos orgánicos y efecto de los tratamientos para su eliminación en arcillas expandibles de suelos mólicos. In: IX Reun. Arg. Cien. Suelo, Paraná, Vol. III : 1177-1183.
- MORRÁS (H.), ROBERT (M.), BOCQUIER (G.), 1981. — Presencia de arcillas fibrosas pedogenéticas en suelos halomórficos de la Provincia de Santa Fe. In: VIII Congr. Geol. Arg., San Luis. Vol. IV : 353-360.
- ODIN (G.), 1975. — Les glauconies. Constitution, formation, âge. Thèse Dr. Sc. Nat Université Paris VI, 250 p.
- PAQUET (H.), BOCQUIER (G.), MILLOT (G.), 1966. — Néoformation et dégradation des minéraux argileux dans certains solonetz solodisés et vertisols du Tchad. *Bull. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.*, 19 : 295-322.
- RAMAN (V.), JACKSON (M.), 1964. — Vermiculite surface morphology. In: Clays and Clay Minerals, 12th. Conference : 423-429.
- ROBERT (M.), TESSIER (D.), 1974. — Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Ann. agron.*, 25, 6 : 859-882.
- SINGER (A.), 1974. — Mineralogy of palagonitic materials from the Golan heights Israel. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 22 : 231-240.
- SINGER (A.), NORRISH (K.), 1974. — Pedogenetic palygorskite occurrences in Australia. *Am. Mineralogist*, Vol. 49 : 508-517.
- SCOPPA (C.), 1976. — La mineralogía de los suelos de la llanura pampeana en la interpretación de su génesis y distribución. In: Actas VII Reun. Arg. Cien. Suelo ; IDIA, Suplem. n° 3 : 659-673.
- SCOPPA (C.), 1978. — El horizonte argílico en los Udoles de la región pampeana. *Rev. Invest. Agrop.*, ser. 3. vol. XII : 97-113.
- SMITH (H.), WILDING (L.), 1972. — Genesis of argillic horizons in Ochraqualls derived from fine textured till deposits of northwestern Ohio and southeastern Michigan. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 36 : 808-815.
- TESSIER (D.), 1975. — Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les matériaux argileux. Thèse Ing., C.N.A.M., Paris, 231 p.
- TESSIER (D.), PEDRO (G.), 1976. — Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. *Science du Sol*, 2 : 85-99.
- TRIBUTH (H.), 1976. — Die umwandlung der glimmerartigen Schichtsilikaten zu aufweitbaren Dreischicht-Tonmineralen. *Z. Pflanzenern. Bodenk.*, 1 : 7-25.
- U.S.D.A., 1975. — Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Handbook*, n° 436, 754 p.
- VAN BENNEKEM (A.), VAN DER GAAST (S.), 1976. — Possible clay structures in frustules of living diatoms. *Geochim. and Cosmochimica Acta*, 40 : 1149-1152.
- WEAVER (C.), 1956. — The distribution and identification of mixed layer clays in sedimentary rocks. *Am. Mineralogist*, 41 : 202-221.
- YAALON (D.), WIEDER (M.), 1976. — Pedogenic palygorskite in some brown (calciorthid) soils of Israel. *Clay Minerals*, 11 : 73-80.