

Scientific registration n° : 1801

Symposium n° : 22

Presentation : poster

Caractérisation minéralogique des argiles des sols volcaniques indurés (tepetates) de la Vallée de Mexico. Minéralogy of the clays in hardened volcanic soils (tepetates) of the Mexico Valley

HIDALGO Claudia (1), THIRY Médard (2), ELSASS Françoise (3), QUANTIN Paul (4)

(1) IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México

(2) ENSMP, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex, France

(3) INRA, Unité des Science du Sol, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles, France

(4) ORSTOM- Centre de Bondy, 32 Av. Henri-Varagnat, 93143 Bondy-Cedex, France

Introduction. *Tepetate* à comportement de *fragipan* est un horizon compact, dur à l'état sec et friable à l'état humide. Sa présence est corrélée à un régime climatique particulier (entre subhumide et subaride) et à sa position dans une climotoposéquence (entre 2400 et 2800 m d'altitude). Sur le terrain, les *tepetates* se présentent intercalés entre des horizons de sol, ils constituent quatre séries de dépôts pyroclastiques. Les séries T₄, T₃ et T₂ sont les plus anciennes (35000-12000 B.P.). Elles s'apparentent à des rhyolites alcalines et sodiques tandis que la série plus récente (T₁) et le sol superficiel (H), se rapprochent de cendres dacitiques.

Résultats. La diffraction des rayons X sur la fraction argile fine (< 0.5 µm) révèle la présence d'argiles interstratifiées 1:1 et 2:1. Celles-ci montrent un composant smectitique plus important dans les *tepetates* que dans les horizons de sol. Deux familles principales ont été identifiées par microscopie électronique: (a) les argiles *en forme de plaquettes* ovoïdes et subanguleuses et d'autres asymétriques semblables aux phyllosilicates 2:1; (b) les argiles *en formes enroulées* (sphères, tubes et en faisceaux). La plupart des formes en plaquettes présentent une composition chimique semblable de celles des minéraux argileux du type 1:1, mais elles sont plus ferrifères que celles-ci. Elles seront donc proches d'interstratifiés 1:1/2:1. Celles de formes asymétriques se rapprochent de celle d'argiles 2:1 (smectites voisines de beidellites ferrifères). Les argiles enroulées (fuseaux, sphères et tubes), apparentées à de l'halloysite d'après leur forme, seraient en fait, d'après leur composition chimique, des édifices interstratifiés 1:1/2:1, à forte composante d'argile 2:1 ferrifère probablement beidellitique.

Discussion et Conclusion. Les argiles qui constituent les *tepetates* sont un mélange d'argiles 1:1 et 2:1, souvent interstratifiées avec une forte composante 2:1beidellitique.

Scientific registration n° : 1801

Symposium n° : 22

Presentation : poster

Caractérisation minéralogique des argiles des sols volcaniques indurés (tepetates) de la Vallée de Mexico. Minéralogy of the clays in hardened volcanic soils (tepetates) of the Mexico Valley

HIDALGO Claudia (1), THIRY Médard (2), ELSASS Françoise (3), QUANTIN Paul (4)

(1) IRENAT-PROEDAF, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México

(2) ENSMP, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex, France

(3) INRA, Unité des Science du Sol, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles, France

(4) ORSTOM- Centre de Bondy, 32 Av. Henri-Varagnat, 93143 Bondy-Cedex, France

Introduction. Dans certains pays d'Amérique Latine - Mexique, Nicaragua, Colombie, Equateur, Pérou et Chili - certains sols d'origine volcanique présentent parfois des horizons durs connus localement sous diverses appellations. Au Mexique on les nomme *tepetates*, ce qui signifie "lit de pierre". Leur exposition en surface après érosion du sol, pose des graves problèmes de gestion agricole et a conduit à la désertification d'immenses régions. Le présent travail porte sur l'étude des *tepetates* à comportement de fragipan, ils sont compacts et durs à l'état sec et friables à l'état humide (Soil Survey Staff, 1994). L'induration de ces *tepetates* a été attribué auparavant à la présence de différentes formes de silice non cristalline, notamment du gel siliceux et de l'opale-A (Hessman, 1991; Hidalgo *et al.*, 1995). Oleschko *et al.*, (1994) considèrent que les argiles de la matrice du sol prennent part aussi à cette induration. A ce sujet, le rôle des argiles dans les propriétés des fragipans a été mis en évidence par la formation de ponts entre les minéraux du sol (Knox, 1957; Wang *et al.*, 1974). Cependant, celles-ci n'ont jamais été considérées comme le facteur principal de leur comportement (Steinhardt and Franzmeir, 1979). En ce qui concerne l'étude des minéraux argileux des *tepetates* de la Vallée de Mexico, elles seraient: de la metahalloysite, de la montmorillonite et de l'illite (Valdez, 1970) ou bien des minéraux à 14 Å semblables aux vermiculites, des minéraux à 10 Å, de la metahalloysite et de l'halloysite (Miehlich, 1991). Partant de ce préalable, les objectives de cette étude ont été de caractériser les argiles des *tepetates* et de mettre en évidence leur rôle dans la formation des sol indurés.

Matériau d'étude. Le *tepetate* à comportement de fragipan représente un stade intermédiaire de l'altération pédologique de tufs pyroclastiques de la vallée de Mexico (Bertaux et Quantin, 1995). Leur présence est corrélée par leur position topographique, le piémont de la Sierra Nevada (2800-4100m d'altitude) ainsi que par le régime climatique,

entre subhumide et subaride (avec une saison sèche de 5 à 6 mois) (Dubroeuq *et al.*, 1989; Miehlich, 1991). Nous avons choisi pour cette étude un profil situé à l'est de la ville de Mexico, en amont du village San Miguel Tlaixpan. Les horizons de sol et de *tepetate* constituent quatre séries de dépôts pyroclastiques: les séries T₄ (horizons 11, 10, 9), T₃ (horizons 8, 7, 6) et T₂ (horizons 5, 4) sont les plus anciennes (35 000-12 000B.P.). Elles s'apparentent à des rhyolites alcalines et sodiques; tandis que la série T₁ (horizons 3, 2), la plus récente, et le sol superficiel H (horizon 1), se rapprochent à des cendres dacitiques. Dans cet ensemble de séries nous avons identifié trois niveaux de *tepetates* (t_{2a}, t_{2b} et t₃) (horizons 5, 7 et 11 respectivement) qui se présentent intercalés entre des horizons de sols.

Techniques et Méthodes d'analyse. *Diffraction de rayons X (DRX)*. Analyses sur la poudre, puis l'agrégat orienté naturel et soumis aux traitements: glycol (g) et chauffage à 100°C, 300°C (ch-3) et 500°C (ch-5). *Microscopie électronique à transmission (MET)*. Examen sur grilles en Cu sur lesquelles ont été déposées des particules d'argile dispersées. *Analyse total par la méthode triacide* (Bétrémieux, 1948). Méthode par solubilisation sélective par attaque triacide des minéraux argileux, oxydes et hydroxydes. L'analyse chimique élémentaire du produit dissout correspond à la composition élémentaire de ceux-ci. Les résultats sont normalisés et les teneurs en éléments chimiques s'expriment en pourcentage d'oxydes anhydres. *Analyse thermique différentielle (ATD)* et *thermogravimétrique (ATG)*. Analyse conduite avec une montée en température de 10°C/mn et sous balayage d'air (80% N₂, 20% O₂) (système *Setaram TG92*). *Spectroscopie infrarouge (IR)*. Méthode classique de préparation de pastilles au KBr par compression sous vide après modifications faites par Hidalgo (1993).

Résultats et Discussion.

Diffraction des rayons X. Les raies principales des diagrammes de diffraction des argiles orientées (or) des horizons de sol (1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10) et de *tepetate* (5, 7, 11) se localisent vers: 0.756-0.741; 0.442-0.445; 0.353-0.358; 0.258 et 0.238-0.240nm. Il y a parfois une bande large entre 1.3 et 1.92nm. Cependant il y a une différence entre les diffractogrammes d'argile orientée (or) des sols et des *tepetates*, elle concerne la hauteur de la réflexion vers 0.445nm (Figure 1). Dans le cas des horizons de sol (h-sol), cette réflexion est très supérieure à celles vers 0.756-0.741nm et 0.358-0.353nm, mais dans les *tepetates* elle est fortement atténuée. Ce comportement fait supposer la présence, dans les horizons de sol de feuillets incurvés qui ne permet pas obtenir une orientation simultanée de tous les feuillets suivant le plan ab (Sawhney, 1989). Elles seraient donc des argiles de formes sphériques et tubulaires. Dans le cas des *tepetates* (h-tepetate), les feuillets se présentent bien orientés (Figure 1), alors les argiles présenteraient une prédominance de formes planes (plaquettes) et peu ou pas de formes enroulées. Un examen plus en détail des diagrammes montre que la réflexion vers 0.741nm correspond à une position intermédiaire entre les réflexions (001) de la kaolinite (0.715nm) et (002) de la smectite séchée à l'air (0.77nm). Celle-ci est caractéristique des interstratifiées irrégulières 1:1 kaolinite/smectite (Sawhney, 1989). Après la saturation par le glycol, (g) (Figure 2), on observe l'aspect "irrationnel" des réflexions de première et deuxième ordre. La première réflexion (0.756nm) se déplace vers les petits angles (0.749nm), tandis que la seconde (0.356nm) vers les grands angles (0.362nm). Ce comportement montre bien la présence d'édifices interstratifiés irréguliers du type 1:1/2:1 dans les horizons de sol et de *tepetate*. Il s'agirait d'argiles interstratifiées

smectite/kaolinite à proportion variable de feuillets 1:1 et 2:1 (Thiry 1973, 1991). L'effet du chauffage à 500°C (ch-5) (Figure 2) entraîne la disparition de la raie vers 0.73nm et le renforcement de la bande centrée sur 1.0nm dans les diagrammes des horizons de sol. Ceci confirme la présence d'une composante 2:1. Concernant les *tepetates*, le gonflement accroît le désordre dans l'empilement des feuillets, ceci se manifeste par le renforcement de la raie vers 0,445nm (Figure 3). D'autre part, le chauffage à 300°C (ch-3) fait apparaître un pic à 0.73nm légèrement resserré, comme c'est le cas des interstratifiés kaolinite/smectite (Yerima et al., 1985; Tomita et Takahashi, 1986; Thiry, 1973, 1991). Puis, la calcination à 500°C fait disparaître les raies 001 et 002 du minéral 1:1. Dans le cas du *tepetate* t_{2b} , la réflexion vers 1.52nm (qui se déplace vers 1.94nm après saturation par le glycol) caractérise un composant 2:1. Après déshydratation à 300°C (ch-3), il persiste une réflexion centrée vers 1.35nm qui se resserre complètement vers 1.0-1.1nm après chauffage à 500°C. Cette réflexion corrobore la présence dans ce *tepetate* d'argiles 2:1 interstratifiées à forte prédominance de smectite.

Microscopie électronique à transmission (MET). Nous avons identifié plusieurs formes d'argiles: de plaquettes ovoïdes et subanguleuses, d'autres sont asymétriques semblables aux phyllosilicates 2:1, ou bien elles présentent des formes enroulées (sphères, tubes et en faisceaux). Ces observations confirment les résultats obtenus par DRX qu'avaient fait supposer la présence d'argiles en plaquettes et enroulées.

Analyse chimique total. La teneur en silice varie entre 54 et 58 % SiO_2 et celle en alumine est comprise entre 29 et 32 % Al_2O_3 . Les valeurs des rapports SiO_2/Al_2O_3 molar (" k_i ") et $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ molar (" k_r ") varient respectivement de 2,9 à 3,4 et de 2,4 à 2,8. Ceux-ci sont bien caractéristiques des minéraux argileux. Cependant, il n'est pas certain qu'il n'y ait pas encore eu dissolution d'une petite quantité de silice non cristalline facilement soluble lors de l'attaque acide. Les valeurs de " k_i ", légèrement plus élevées dans les horizons 3, 6 et 7 (3,40) confirment l'abondance d'argiles smectitiques dans ces horizons. Ceci est bien en accord avec les résultats de DRX. La teneur en oxyde de fer (9-10 % Fe_2O_3) montre leur abondance dans les minéraux argileux et/ou sous forme d'oxyde libre. Les teneurs en MgO varient entre 1 et 2%. L'accroissement de Mg dans les horizons 6 et 7 (1,75 %) ainsi qu'en oxyde de potassium (0,45-0,48 % K_2O) marque une proportion plus grande d'argiles 2:1 (smectites) dans ces horizons. Puisque le matériau originel contient moins de magnésium que de calcium (Hidalgo, 1991) il est probable qu'il y ait une rétention sélective de Mg et K par les minéraux argileux. Les teneurs élevées en oxyde de calcium (1,2-1,8 % CaO) des horizons 6, 7, 8 est bien en accord avec la présence de nodules de calcium dans cette partie du profil.

Analyse thermique différentielle (ATD). On observe trois réactions majeures (Figure 4). Le premier pic (entre 122-140°C) est endothermique et résulte de la perte d'eau interparticulaire et interfoliaire. Il est caractéristique d'argiles 2:1 ou d'interstratifiés 7-14Sm (Lucas *et al.*, 1974). Le deuxième pic (entre 510-520°C) aussi endothermique, marque la déshydroxylation des argiles 1:1. Sa position se rapproche de la valeur (515°C) rapportée par Quantin *et al.* (1984, 1988) pour une halloysite à 10Å et il est légèrement inférieure à celui des interstratifiés 7-14Sm (520-540°C) et des beidellites alumino-ferrifères (Lucas *et al.*, 1974; Thiry, 1991). Le troisième pic (entre 874 et 890°C) est exothermique, bien développé, dissymétrique et évasé vers les hautes températures. Il marque la recristallisation en *mullite* (silicate d'alumine $Si_2Al_6O_{13}$) des argiles anhydres (Paterson et

Swaffield, 1987). Dans certains diagrammes apparaît une très faible inflexion endothermique vers les 300 à 350°C, qui marque probablement des traces d'oxyhydroxyde de fer.

Analyse thermogravimétrique(ATG). Les courbes thermogravimétriques des réactions endothermiques (130°C et 510-520°C) sont formées de deux pentes (Figure 4). La première située entre 50 et 230°C correspond à la perte de poids due à la déshydratation, la grandeur de celle-ci varie entre 9 et 11% et fait présumer l'existence d'espèces hydratées. La seconde pente (entre 300 et 1000°C) révèle que la déshydroxylation des groupes OH des couches silicatées et des hydroxydes s'effectue en deux temps. Ce comportement peut être éventuellement rapporté à la présence de deux types de feuillets 1:1 et 2:1 et assimilé au comportement des interstratifiés kaolinite/smectite (Thiry et Hauff, 1991). Les valeurs de déshydroxylation entre 9 et 10% d'argile déshydratée sont bien inférieures à la perte de poids théorique de la kaolinite anhydre et de l'halloysite pure (13,7-13,9%) (Quantin *et al.*, 1998; Delvaux *et al.*, 1990). Les horizons proches de la surface (1 et 2) et ceux de la série T₃ (9,10,11) présentent des pourcentages plus élevés ((10%), ils s'expliqueraient par la présence, soit des OH liés à la matière organique pour les premiers, soit à des oxyhydroxydes de fer pour les seconds.

Quantification des minéraux argileux 1:1 et 2:1 par l'analyse thermique. Cette quantification a comporté deux étapes: (a) l'estimation de la perte de poids associée au départ des molécules d'eau d'hydratation entre 50 et 250°C et (b) l'estimation de la perte de poids associée au départ des ions OH (des oxyhydroxydes de fer et du réseau cristallin des minéraux argileux). Nous avons fait l'hypothèse que la perte de poids entre 250 et 380°C est due aux oxyhydroxydes de fer et n'avons estimé la perte de poids des OH des argiles qu'entre 380 et 830°C. Dans la deuxième étape nous avons fait une correction pour calculer les valeurs de déshydroxylation (OH des argiles) en % d'argile déshydratée, sans la perte supposée des OH et des oxyhydroxydes de fer, puis normalisation. L'estimation des pourcentages d'argiles présents (Tableau 1) a été effectuée en considérant un mélange d'halloysite et de smectite (d'après les analyses minéralogiques) et en attribuant une perte de poids théorique de 14% pour l'argile 1:1 (kaolinite) et de 5% pour l'argile 2:1 (beidellite) (Paterson et Swaffield, 1987).

Tableau 1

Pourcentages d'argile 1:1 et 2:1 dans la fraction fine (<0,5µm)*											
Horizon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
% argile 1:1	56	54	52	51	46	45	42	52	55	53	53
% argile 2:1	44	46	48	49	54	55	58	48	45	47	47

* : calculés sur la perte de poids anhydre.

Ces résultats, de même que les valeurs importantes de la capacité d'échange cationique (CEC) (Hidalgo, 1991), corroborent l'abondante présence d'argiles à charge permanente élevée, tels que les smectites et interstratifiées 2:1, dans tous les horizons du profil, mais elles sont plus abondantes dans les horizons 6 et 7.

Spectroscopie infrarouge (IR). Les bandes vers 3698cm⁻¹ (OH-Al externes) et 3620cm⁻¹ (OH-Al internes), correspondent aux vibrations (stretching) des OH liés à l'aluminium de la couche octaédrique des argiles 1:1 (halloysite). Le dédoublement des bandes

3648→3656cm⁻¹ et 3620→3632cm⁻¹ suggère la présence d'une argile 2:1. La présence des argiles 2:1 ferrifères a été mise en évidence par l'apparition d'une bande vers 3676cm⁻¹ et un épaulement à 3600cm⁻¹ attribués à la liaison OH-Al,Fe (#3580cm⁻¹) des OH d'argiles 2:1. Puis, ceci a été corroboré par l'inflexion bien marquée vers 874cm⁻¹ attribuée au couple Al-Fe_{III} en position octaédrique (Farmer, 1974, Goodman *et al.*, 1976, Wada et Mizota, 1982, Quantin *et al.*, 1984). Les vibrations entre 1200 et 400cm⁻¹ concernent aux bandes d'élongation (stretching) et de déformation (bending) des liaisons Si-O, Si-O-Si, Si-O-Al, Al-O-Al, Al-OH, Al,Fe-OH, etc. dans la couche tétraédrique des phyllosilicates. A cette région s'ajoute un épaulement à 1000cm⁻¹ et une bande à 750cm⁻¹ dues à la vibration des liaisons Si-O-Al des argiles 1:1. Puis une bande vers 917cm⁻¹ marque les vibrations de déformation (bending) des liaisons OH-Al d'argile 1:1 et 2:1 dioctaédriques. En résumé, la présence d'une argile 1:1 dans les horizons de sol et de *tepetate* est évidente par l'intensité des bandes OH-Al #3696, 3620, 1025, 1000, 750, 690, 540, 471 et 432 cm⁻¹. De même, l'importante présence de beidellite ferrifère ressort par les bandes #3676, 3632, 3600, 874cm⁻¹.

Conclusion. Les argiles qui constituent les *tepetates* sont un mélange d'argiles 1:1 et 2:1, interstratifiées avec une forte composante 2:1 smectitique voisine de beidellites ferrifères. Il s'agit d'une interstratification irrégulière kaolinite/smectite, dont la distribution non ordonnée est contrôlée par la proportion des feuilletts 1:1 et 2:1 (Sawhney, 1989). Les argiles des *tepetates* présentent une meilleure orientation en comparaison à celles des horizons de sol et elles sont fortement structurées en "plaquettes orientées". L'organisation des argiles des *tepetates* résulte probablement de la texture microlaminaire de la matrice du tuf volcanique (leur matériau d'origine). Ceci explique l'importante cohésion et compacité de sa matrice. Elle est d'autant plus forte que l'argile est déshydratée (saison sèche), mais ces propriétés sont réversibles et l'argile gonflant devient plastique quand elle se réhydrate (saison humide). La réversibilité de ces propriétés dépend du pourcentage existant d'argiles gonflants (smectites). Cependant, il existe aussi des gels de silice et de l'opale-A qui contribuent au comportement du *tepetate* quand il est sec (Hidalgo *et al.*, 1995). Du fait que le *tepetate* est l'étape initiale de l'altération d'un tuf volcanique et que la vitesse d'altération du tuf est lente, on peut considérer que les minéraux primaires, les plus petits et les moins ou peu stables, tels que le verre volcanique, sont les précurseurs de la plupart des argiles (Karathanasis, 1989). Nous proposons aussi de prendre en compte ultérieurement la présence de minéraux argileux interstratifiés 1:1/2:1 comme un des critères importants dans la classification des *tepetates* de la Vallée de Mexico.

Bibliographie.

- Bertaux, J. et P. Quantin. 1995. Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d'une séquence d'altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (Mexique). *Transactions, Vol. 6a, WCSS*, Acapulco, México: 232- 233.
- Bétrémieux, R. 1948. Méthodes aux réactifs triacides. In: Brumel (Ed): *Traité pratique de chimie végétale*. Tome II: 87-102.
- Delvaux, B., A.J. Herbillon, L. Vielvoye et M.M. Mestdagh. 1990. Surface properties and clay mineralogy of hydrated halloysitic soil clays. II: Evidence for the presence of halloysite/smectite (H/Sm) mixed-layer clays. *Clay Minerals*, 25: 141-160.

- Dubroecq, D., P. Quanti y C. Zebrowski. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7:3-12.
- Farmer, V.C. 1974. The layer silicates. In: V.C. Farmer (Ed): *The infrared spectra of minerals*, Mineralogical Society, London: 331-363.
- Goodman, B.A., J.D. Russell, A.R. Fraser et F.W.D. Woodhams. 1976. A Mössbauer and IR spectroscopic study of the structure of nontronite. *Clays Clay Min.*, 24: 54-59.
- Hessmnn, R. 1991. Micromorphological investigations on "tepetate" formation in the 'toba'. Sediments of the state of Tlaxcala (Mexico). *Terra*, Vol. 10, pp. 145-150.
- Hidalgo, C. 1991. *Contribution à l'étude des sols volcaniques indurés ("tepetates") de la région de Mexico (cimentation, induration)*. D.E.A. de Pédologie. Université de Nancy I: 57 pp.
- Hidalgo, C. 1993. Utilisation de la spectroscopie IR pour l'étude d'une séquence d'altération de tufs pyroclastiques (région de Texcoco, Mexique). In: Résumen Journée d'étude: "Spectroscopie infrarouge et analyse minéralogique quantitative des roches", ORSTOM.-MNHN; Bondy, France: 35-37.
- Hidalgo, C., J. Bertaux and P. Quantin. 1995. Forms of silica in indurated volcanic soils of the Mexico Valley. In: G.C. Churchman, R.W. Fitzpatrick and R.A. Eggleton (Eds), *Proceedings of the 10th International Clay Conference*. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia: 487-493.
- Karathanasis, A.D. 1989. Solution chemistry of fragipans-thermodynamic approach to understanding fragipans formation. In: *Fragipans: their occurrence, classification and geneis*. SSSA Special publication, n°24: 113-139.
- Knox, E.G. 1957. Fragipan horizons in New York Soils: III. The basis of rigidity. *Soil Sci. Soc. Proc.*: 326-330.
- Lucas, J., N. Trauth et M. Thiry. 1974. Les minéraux argileux des sédiments paléogènes de bassin de Paris. Evolution des smectites et des interstratifiés (7-14sm). *Bull. Gr. Fr. Argiles*, n°21: 245-262.
- Miehlich, G. 1991. *Chronosequences of volcanique ash soils*. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 15, Hamburg.
- Oleschko, K., C. Zebrowski, P. Quantin y N. Fedoroff. 1991. Patrones micromorfológicos de organización de arcillas en tepetates (México). *Terra*, Vol. 10: 183-191.
- Oleschko, K., C. Zebrowski, P. Quantin, N. Fedoroff and E. Osoro. 1994. Hardened Volcanic Soils (Tepetate) in Mexico: their geological, pedological or anthropological origin. *Transactions, Vol. 6a, Commission V, WCSS*, Acapulco, México: 229-240.
- Paterson, E. et R. Swaffield. 1987. Thermal Analysis. In: M.J. Wilson (Ed): *A handbook of determinative methods in clay mineralogy*. Chapman and Hall, New York: 99-131.
- Quantin, P., A.J. Herbillon, C. Janot et G. Siefferman. 1984. L"halloysite" blanche riche en fer de Vate (Vanuatu). Hypothèse d'un édifice interstratifié halloysite-hisingerite. *Clay Minerals*, 19:629-643.
- Quantin, P., J. Gautheyrou et P. Lorenzoni. 1988. Halloysite formation through *in situ* weathering of volcanic glass from trachytic pumices, Vico's volcano, Italy. *Clay Minerals*, 23:423-437.
- Sawhney, B.L. 1989. Interstratification in layer silicates. In: J.B. Dixon and S.B. Weed (Ed). *Minerals in Soil Environments*. SSSA Book series, n°1. USA. pp.789-829.

- Soil Survey Staff. 1994. *Keys to Soil Taxonomy*. Six Edition. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service: 6-8.
- Steinhardt, G.C. and D.P. Franzmeir. 1979. Chemical and mineralogical properties of the fragipans of the Cincinnati Catena. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:1008-1013.
- Thiry, M. 1973. *Les sédiments de l'Eocène inférieur du Bassin de Paris et leurs relations avec la paléaltération de la craie*. Thèse 3e cycle, Strasbourg.
- Thiry, M. 1991. Les argiles plastiques du bassin de Paris. *G.F.A. (livret guide)*, Fontainebleau, France: 45pp.
- Thiry, M. et Ph. Hauff. 1991. Kaolinite/smectite clay models using thermal and X-ray diffraction data. *Proc 7th Euroclay Conf.* Dresden'91, Greifswald: 1073-1077.
- Tomita, K. et H. Takahashi. 1986. Qualification curves for the X-ray powder diffraction analysis of mixed-layer kaolinite/smectite. *Clays and Clay Min.*, 34: 323-329.
- Valdez, M.L. 1970. *Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la Cuenca de México*. Tesis M.C. especialista en Suelos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México: 178pp.
- Wada, S.I. et C. Mizota. 1982. Iron-rich halloysite (10Å) with crumpled lamellar morphology from Hokkaido, Japan. *Clays and Clay Minerals*, 30 (4): 315-317.
- Wang, C.H., J.L. Nowland and H. Kodama. 1974. Properties of two fragipan soils in Nova Scotia Including scanning electron Micrographs. *Can. J. Soil Sci.* 54:159-170.
- Yerima, B.P.K., F.G. Calhoun, A.L. Senkayi et J.B. Dixon. 1985. Occurrence of interstratified kaol-smec in El Salvador vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:462-466.

Key Words: mineralogy, clays, soil, tepetates, Mexico, volcanic soils

Mots clés: mineralogie, argiles, sol, tepetates, Mexico, sol volcanique

Ces minéraux argileux sont fortement structurés en "plaquettes orientées", ce qui explique l'importante cohésion et compacité de la matrice du *tepetate*.

Key Words: mineralogy, clays, soil, tepetates, Mexico, volcanic soils

Mots clés: minéralogie, argiles, sol, tepetates, Mexico, sol volcanique