

# Effets sur le paysage et chronologie du phénomène

Daniel GEISSERT

*Instituto de Ecología A.C., apartado postal 63, 91000 Xalapa, Veracruz, Mexico*

## RÉSUMÉ

*Les tepetates de Xalapa se forment à partir de l'altération ferrallitique d'une andésite basaltique du Pléistocène inférieur. Leur développement est progressif et se traduit dans le paysage par un modelé typique. L'étape initiale correspond à des collines convexes sur sol ferrallitique à plinthite et l'étape avancée à des collines surbaissées et aplanies, couvertes d'horizons laminaires indurés. L'altération ferrallitique s'est déroulée au cours d'une longue période de stabilité volcano-tectonique et climatique du Pléistocène moyen, alors que les phases d'induration ont débuté au Pléistocène supérieur et se poursuivent encore de nos jours.*

**MOTS CLÉS :** Paysage – Volcanisme – Géochronologie – Mexique – Géomorphologie – Silicification.

## ABSTRACT

### CONSEQUENCES ON LAND-FORM EVOLUTION AND CHRONOLOGICAL FRAME

*The tepetate formations of the Xalapa area are built on an old Pleistocene meseta of andesitic lava flows. Their expansion along the meseta surface is progressive and each stage corresponds to a typical landscape: convex hills with incipient tepetate (plinthic or initial stage) that change gradually to straight flat-convex hills with laminar indurated layers (advanced stage). The ferrallitic weathering of the andesite basement, previous to tepetate formation, occurred during a long period of volcanic and climatic stability, placed in middle Pleistocene. The indurations we observe nowadays started during the young Pleistocene.*

**KEY WORDS :** Landscape – Volcanism – Geochronology – Mexico – Geomorphology – Silicification.

## RESUMEN

*Los tepetates de Xalapa se forman a partir de la alteración de una meseta de basalto-andesita del Pleistoceno inferior. A cada etapa de su desarrollo progresivo a lo largo de la meseta se asocia un relieve modelado típico, que va desde un lomerío convexo con tepetate incipiente (etapa inicial) hasta un lomerío plano-convexo y alargado, con horizontes laminares endurecidos (etapa avanzada). La alteración ferráltica previa a la formación del tepetate ocurrió durante un período prolongado de estabilidad volcano-tectónica y*

*climática del Pleistoceno medio, mientras que las fases de endurecimiento se iniciaron en el Pleistoceno superior, extendiéndose hasta la actualidad.*

PALABRAS CLAVES : Paysage – Volcanismo – Geocronología – Mexico – Geomorfología – Silicificación.

## INTRODUCTION

### Relation des tepetates avec une paléosurface

Il a été montré récemment que les tepetates de la région de Xalapa sont liés à une paléosurface d'altération ferrallitique, située à l'est de Xalapa, sur une épaisse coulée de lave qui s'étale vers le SE (fig. 1) (GEISSERT et DUBROEUCQ, 1990). Selon NEGENDANK *et al.* (1985) sa composition chimique est celle d'une andésite basique (tabl. I) provenant de l'éruption d'un cône monogénétique plutôt que d'un strato-volcan comme le Cofre de Perote, situé 25 km plus à l'ouest. En effet, le contenu en SiO<sub>2</sub> des andésites du Cofre de Perote est plus élevé (61 à 62%), de même que celui en K<sub>2</sub>O (2,5 à 2,6%). Selon ces mêmes auteurs, la coulée de lave aurait été mise en place au Quaternaire ancien, ce qui a été confirmé ultérieurement par une datation de 1,70 ± 0,20 ma. B.P., situant cette phase éruptive à la charnière entre le Pliocène et le Pléistocène. La lave est recouverte par des placages sporadiques de cendres trachytiques, mis en place lors de coulées pyroclastiques probablement du Pleistocène supérieur.

TABLEAU I

Composition chimique d'ensemble  
de l'andésite basaltique de la paléosurface  
*Basalt-andesitic paleosurface global chemical composition*

SiO <sub>2</sub>	56.7 - 57.1
TiO <sub>2</sub>	1.03 - 1.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.9 - 17.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.20 - 4.73
FeO	2.50 - 4.80
MnO	0.12 - 0.12
MgO	4.36 - 4.76
CaO	6.95 - 7.04
Na <sub>2</sub> O	3.60 - 3.73
K <sub>2</sub> O	1.73 - 1.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27 - 0.29
H <sub>2</sub> O+	0.59 - 0.59
CO <sub>2</sub>	0.05 - 0.07

Cette paléosurface a l'allure d'une planèze inclinée et ondulée qui longe un fossé d'effondrement de direction NW-SE, correspondant à l'actuelle

vallée de la Concepción. La planèze est recoupée par deux ensembles de failles presque orthogonales : les plus importantes orientées vers le NW-SE et le NE-SW et les autres de direction NNW et WSW. Cette tectonique cassante joue un rôle géomorphologique important car, d'une part, elle a soulevé partiellement la coulée andésitique et, d'autre part, elle guide un réseau hydrographique très encaissé qui recoupe la planèze.

Il a été également démontré que les tepetates proviennent de la transformation de la couverture ferrallitique de la planèze, par un mécanisme de destruction géochimique de l'hallowysite suivi de processus de silicification (CAMPOS et DUBROEUCQ, 1990). Il se forme des horizons prismatiques compacts, appauvris en plasma argileux, qui alternent avec des horizons laminaires, enrichis en silice et indurés.

Le but de ce travail est de montrer plus généralement que le développement du tepetate est progressif le long de la paléosurface et que le modelé actuel résulte de l'évolution des sols dans le paysage. À partir de la datation du substrat on tentera d'établir une chronologie du phénomène.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Au moyen de la photo-interprétation à 1:50 000 et 1:20 000, vérifiée sur le terrain, on délimite les types de modelés de la paléosurface.

2. Pour chaque type de modelé on effectue des relevés topographiques détaillés le long de transects transversaux.

3. À l'aide de sondages à la tarière, de fosses pédologiques et d'observations de coupes naturelles on décrit la structure d'ensemble des matériaux et les sols qui les surmontent. On obtient ainsi des sections détaillées du modelé avec le sol (tepetate) qui lui correspond.

4. À partir de datations radiométriques, de la succession des événements proposée par NEGENDANK *et al.* (*op. cit.*) et de notre propre interprétation géomorphologique de la zone, une chronologie des

principaux événements volcanotectoniques et climatiques qui auraient contribué à la formation et à l'évolution du tepetate est proposée.

## RÉSULTATS

### Le modèle actuel traduit l'évolution des sols

Dans la *partie amont* de la paléosurface, correspondant à la zone du Sumidero à 1 320 m d'altitude, les collines sont convexes, légèrement aplanies en

surface et les versants ont une forme en demi parabole presque parfaite (fig. 2a). Du sommet vers le bas de versant, les pentes augmentent de moins de 5% à 35%, puis rediminuent au niveau du raccord avec le fond de vallon qui est concave ou plat. La différence d'altitude entre le sommet et le fond du talweg oscille entre 10 et 15 m. Ces collines sont séparées par des vallons au tracé curvilinéaire, organisés en système dentritique qui suit le sens général de la coulée de lave. Ces vallées sont témoins d'un système de drainage qui ne fonc-

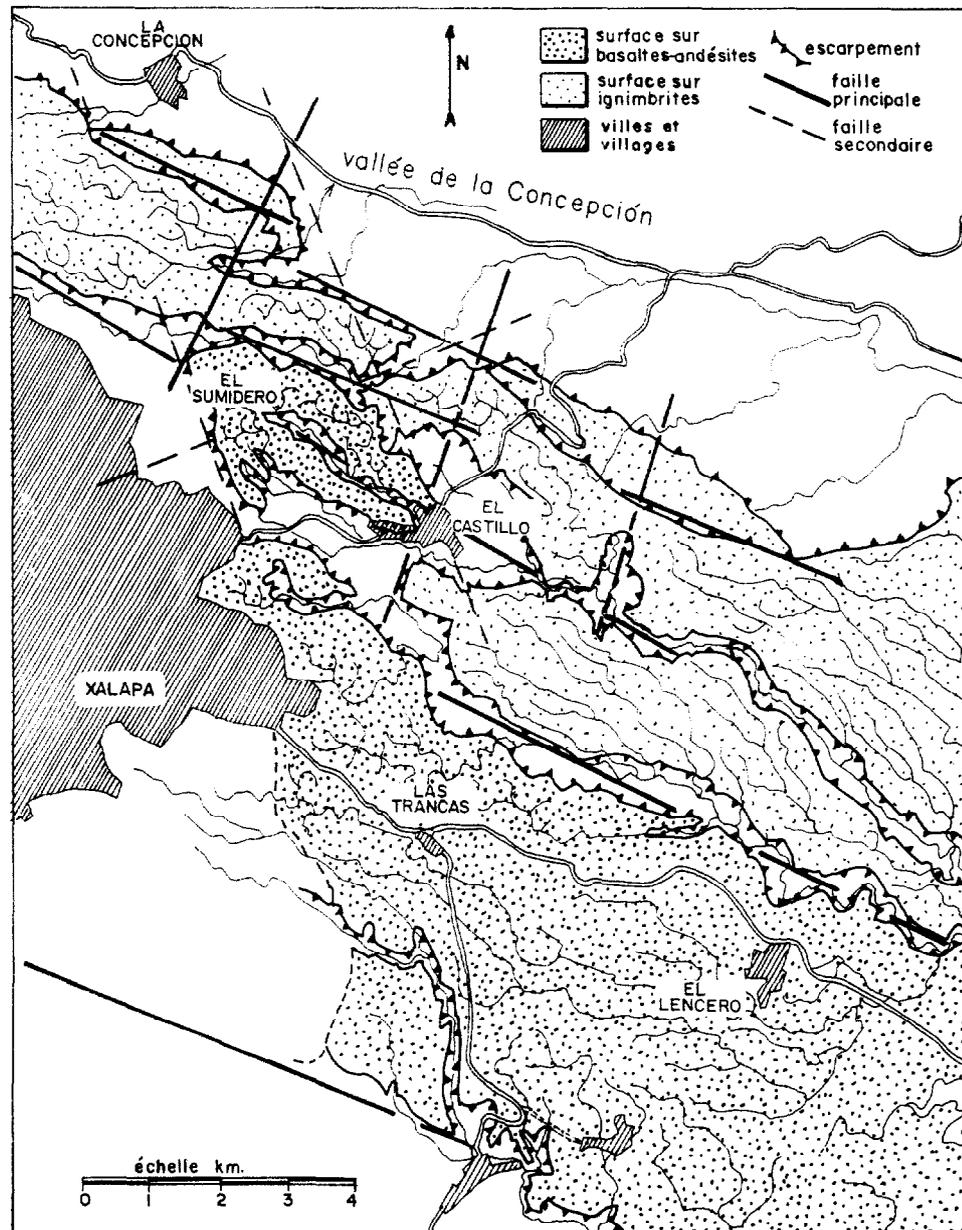


Fig. 1. – Planèze andésitique et paléosurface.  
Andesitic planeze and paleosurface.

tionne plus de nos jours. Les écoulements superficiels actuels sont rares et le fond des vallons est

souvent engorgé, favorisant la formation de zones marécageuses.

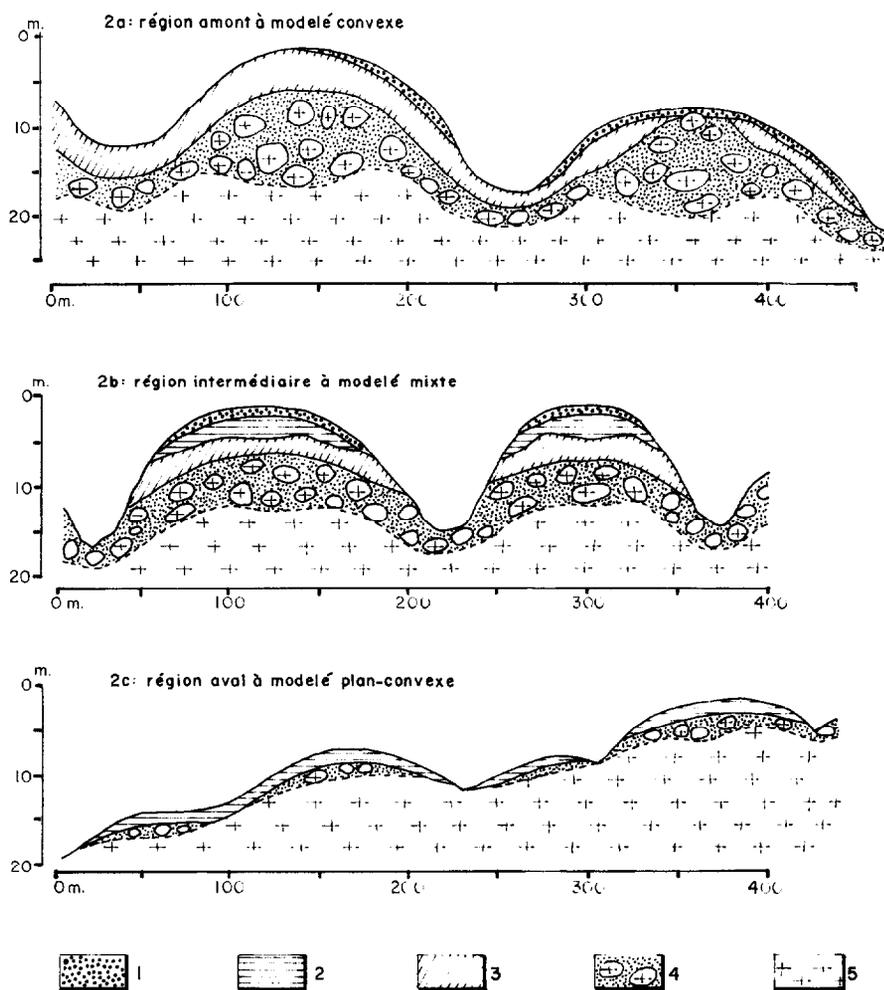


FIG. 2. – Types de modelés sur tepetate. 1= cendres; 2= tepetate; 3= sol ferrallitique; 4= andésite altérée; 5= andésite.  
*Landform types with tepetate. 1= volcanic ashes; 2= tepetate; 3= ferrallitic soil; 4= weathered andesite; 5= andesitic basement.*

Le sol ferrallitique provenant de l'altération de la lave couvre tout le paysage, sauf sur certains hauts de versants et sommets où peuvent affleurer des blocs de lave. À la base du sol ferrallitique commencent à se former des "taches" grises qui donnent une plinthite. Plus en aval, ces taches s'organisent en bandes subhorizontales et prennent la même inclinaison que la coulée de lave vers le SE. C'est l'étape initiale de la formation d'un tepetate dans le sol ferrallitique.

Dans la *partie intermédiaire*, comprise entre El Castillo et las Trancas à environ 1 200 m d'altitude,

un nouveau modelé prend le relais (fig. 2b). Les collines sont plus planes en surface, mais le haut de versant reste convexe. Ensuite, après une légère rupture de pente, le versant devient droit avec une inclinaison de 30 à 40%, puis se raccorde avec le fond de vallon en forme de V ouvert. Les talwegs ont 15 à 20 m de profondeur et un tracé rectiligne, en partie guidé par les failles.

Les sols situés dans la partie convexe des collines sont indurés et formés de deux ou trois discontinuités laminaires silicifiées, séparées par des horizons prismatiques compacts, dans un matériau argileux

d'altération de 4 à 5 m d'épaisseur. Dans la partie rectiligne des versants, le tepetate est tronqué et fait place au sol ferrallitique. Dans le fond du vallon on atteint l'andésite altérée. Aucun placage cendreux ne subsiste sur les parties rectilignes des versants et dans les entailles.

Cet approfondissement des vallons est dû à l'action d'un nouveau système de dissection qui a incisé les anciennes vallées curvilinéaires et a tronqué le tepetate en cours de formation. L'entaille en V a donc eu lieu après le début de la formation des indurations et postérieurement à la mise en place des cendres.

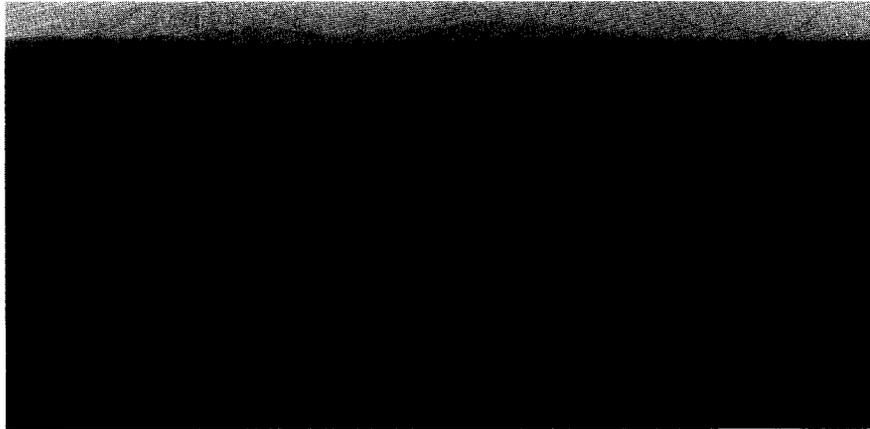


PHOTO 1 – Aspect du paysage de la partie inférieure de la paléosurface.  
*Some aspects of landscape in the lower part of the paleosurface.*

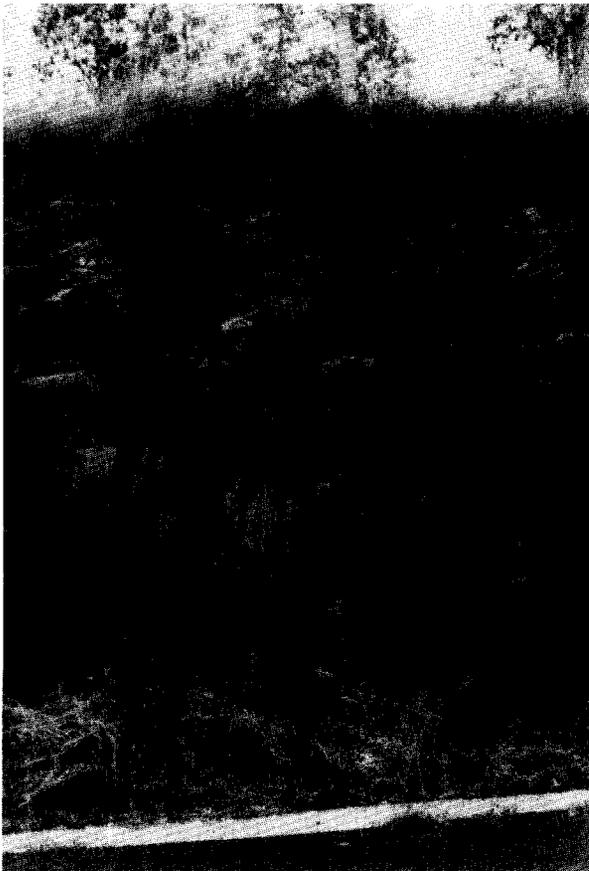


PHOTO 2 – Le tepetate de la partie inférieure de la paléosurface est un sol squelettique montrant de nombreux horizons laminaires indurés reposant directement sur la roche en voie d'altération.  
*In the lower part of the paleosurface, the tepetate is a shallow soil with many laminar hardpans directly lying upon the weathered parent rock.*

Dans la *partie aval*, correspondant à la zone de El Lencero à 1 080 m d'altitude, le paysage change complètement. Les collines deviennent planes en surface mais conservent la convexité des hauts de versants (fig. 2c). Elles sont allongées et séparées par des vallons en forme de V, rectilignes et orientés dans le même sens que la coulée de lave (photo 1). La différence d'altitude entre le sommet et le talweg n'est plus que de 5 m.

En surface affleure un tepetate très compact formé par 6 ou 7 lamines indurées qui reposent sur moins d'un mètre d'altération ferrallitique ou même directement sur la roche saine (photo 2).

Ces changements dans le paysage ont lieu sur une distance inférieure à 15 km et montrent bien que la formation du tepetate n'est pas uniforme le long de la planèze. En fait, il s'étend progressivement de l'aval vers l'amont, c'est-à-dire qu'il a tendance à remonter la structure géologique. Plus il est évolué, plus il devient mince et dur, et se traduit dans le paysage par un aplanissement du relief

suite à l'amincissement de la couverture pédologique (CAMPOS et DUBROEUCQ, *op. cit.*).

### UN PHÉNOMÈNE DE LONGUE DURÉE

La coulée d'andésite basaltique couverte par le tepetate est déjà ancienne (fig.3). Elle provient d'une phase effusive fin Pliocène-début Pléistocène, contemporaine des émissions de lave qui auraient formé la base du complexe volcanique du Cofre de Perote (CANTAGREL et ROBIN, 1979) et du Pico de Orizaba (ROBIN et CANTAGREL, 1982), deux strato-volcans qui constituent la limite orientale de l'axe néovolcanique mexicain. NEGENDANK *et al.* (1985) étend à tout le Pléistocène inférieur cette phase effusive qui a donné lieu au champ de lave à l'est de Xalapa, c'est-à-dire jusque vers 720 000 ans B.P. environ.

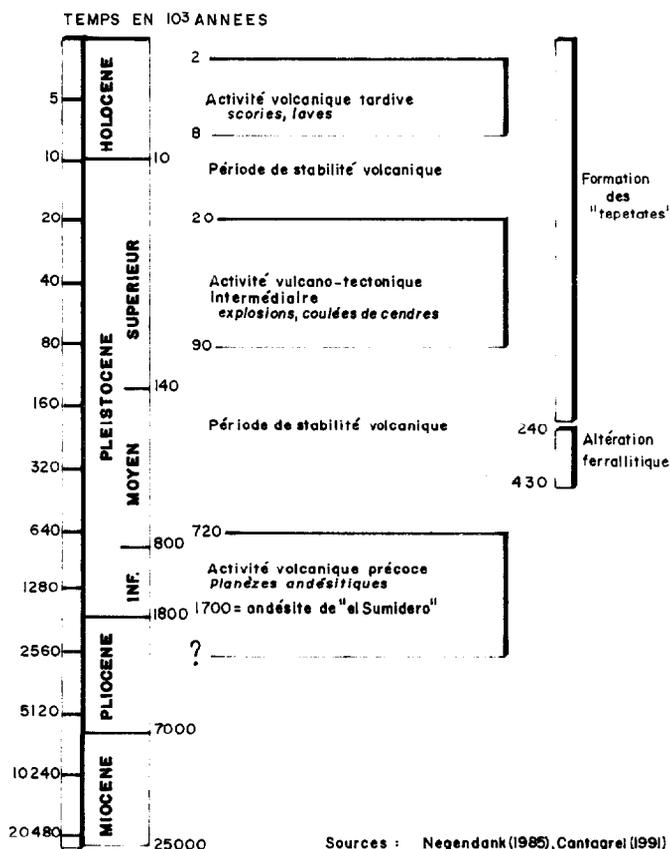


FIG. 3. - Chronologie de la formation du tepetate.  
Chronological frame for tepetate formation.

Cette période initiale a été suivie au cours du Pléistocène moyen et début du Pléistocène supérieur par une longue période d'accalmie volcanique et de stabilité tectonique au cours de laquelle s'est produite l'altération ferrallitique du soubassement et s'élabore un nouveau modelé en collines. L'action de conditions climatiques probablement plus chaudes et plus humides qu'actuellement, pendant une durée prolongée, ont ainsi permis au substrat andésitique de s'altérer sur plusieurs mètres d'épaisseur. De telles conditions ont régné durant le pluvial Mindel-Riss qu'on a placé entre 430 000 et 240 000 ans (OLIVER, 1973). C'est dans ce manteau d'altération qu'on trouve actuellement le tepetate. Par la suite, les rythmes climatiques ont changé et les alternances entre périodes humides et sèches sont devenues plus fréquentes, ce qui a favorisé la mobilisation de la silice et la formation des indurations.

Plus tard, au cours du Pléistocène supérieur, entre 90 000 et 20 000 ans environ, une nouvelle phase d'activité volcanique de type explosif a lieu dans la région, engendrant de nombreux produits pyroclastiques et quelques coulées de lave peu étendues, qui n'ont pas subi d'altération intense et ne comptent pas de tepetate. Cette phase volcanique intermédiaire s'associe à une activité tectonique importante, responsable de la fracturation du soubassement et de l'effondrement de la vallée de la Concepción. Un nouveau niveau de base local, situé près de 400 m en contrebas de la surface de la planèze, a entraîné un changement de direction du drainage de la paléosurface, l'incision des anciens vallons curvilinéaires et la formation de nouveaux axes de drainage, qui recoupent le tepetate. Ce nouveau système de dissection qui est celui des vallées en V, s'est développé durant la brève période de stabilité volcanique de la fin du Pléistocène supérieur et début de l'Holocène, qu'on placera entre 20 000 et 8 000 ans environ.

À l'Holocène, une activité volcanique tardive, produite par de petits cônes disséminés dans la région, a mis en place des coulées basaltiques et des projections de cendres qui ont recouvert les dépôts plus anciens ainsi que les tepetates. Aucun de ces matériaux récents n'est induré.

Ces faits montrent que le tepetate a commencé à se former avant la période vulcano-tectonique du pléistocène supérieur et que, malgré de fortes contraintes (dissection, changements de niveaux de base), son développement se poursuit toujours de

nos jours, grâce à des conditions climatiques restées favorables (HEINE, 1973).

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Au cours de son évolution, le tepetate transforme le paysage ; l'examen du modelé actuel permet d'en reconnaître les principales étapes :

(I) *étape initiale*, qui correspond aux collines convexes et où l'apparition d'une plinthite marque le début de la formation du tepetate ;

(II) *étape intermédiaire*, où le tepetate se présente comme une alternance d'horizons prismatiques compacts et d'horizons laminaires indurés, ce qui se traduit par un modelé mixte à collines convexes plus ou moins aplanies ;

(III) *étape avancée*, où le tepetate est constitué uniquement d'horizons laminaires indurés qui épousent les formes de la coulée de lave. Le paysage se compose de collines surbaissées plan-convexes.

Entre ces trois stades d'évolution on trouve une multitude de formes de transition qui rendent difficile leur délimitation. Il est apparu pourtant que le processus est déjà bien avancé puisque l'étape initiale n'est plus réduite qu'à un petit secteur à l'amont de la coulée, alors que les modelés intermédiaires et avancés couvrent le reste de la surface. Cela confirme une fois de plus que le phénomène est ancien, tant celui de l'altération ferrallitique initiale, débutée il y a plus de 400 000 ans, que celui des indurations qui a commencé au-delà de 200 000 ans. Cela est important dans le contexte mexicain où les tepetates sur formations volcaniques quaternaires sont généralement récents. L'exemple de Xalapa montre aussi que des indurations silicifiées peuvent se former sur un matériau volcanique plutôt basique et non seulement sur des produits acides et riches en verres.

*Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 30 juin 1992*

## BIBLIOGRAPHIE

- BOULET (R.), HUMBEL (F.X.) LUCAS (Y.), 1982. – Analyse structurale et cartographie en pédologie. II – Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XIX, 4 : 323-339.
- BRINCKMANN (R.), 1970. – Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process. *Geoderma*, 3 : 199-206.
- CAMPOS (A.), DUBROEUCQ (D.) 1990. – Formación de los tepetates en suelos provenientes de las alteraciones de materiales volcánicos. *Revista Terra*, vol. 8, 2 : 137-147.
- CANTAGREL (J.M.), ROBIN (C.) 1979. – K-Ar dating on eastern mexican volcanic rocks. Relations between the andesitic and the alkaline provinces. *J. of Volcan. and Geoth. Res.*, 5 : 99-114.
- DREES (R.), WILDING (L.P.), SMECI (N.E.) et SENKAYI (A.), 1989. – Soil Science Society of America. *Book series n° 1 : Minerals in Soil Environments*. Madison, WI 53711, USA.
- DUBROEUCQ (D.), QUANTIN (P.) et ZEBROWSKI (C.), 1989. – Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7(1) : 1-3.
- ESPIAU (P.) et PEDRO (G.), 1983. – Étude du phénomène de ferrollyse par voie expérimentale. Production d'acidité d'échange et mise en évidence du rôle catalytique des minéraux argileux. *Science du Sol*, 3-4 : 173-184.
- GEISSERT (D.), DUBROEUCQ (D.) 1990. – Los tepetates del área de Xalapa y su relación con una paleosuperficie. Una perspectiva cronológica. *Revista Terra*, vol. 8, 2 : 148-155.
- HEINE (K.) 1973. – Variaciones más importantes del clima durante los últimos 40,000 años en México. Puebla, Pue., México, *Comunicaciones*, 7 : 51-58.
- MILNES (A.R.), WRIGHT (M.J.) et THIRY (M.), 1991. – Silica accumulations in saprolites and soils in South Australia. *Soil Science Society of America*, special publication n° 26: Occurrence, characteristics, and genesis of carbonate, gypsum and silica accumulations in soils. Madison, WI 53711, USA.
- MIRANDA (M.M.E.), DELGADILLO (P.M.E.) et RUIZ (H. B.R.), 1989. – Evaluación de seis formas de roturación del tepetate amarillo para incorporarlo a la producción en el oriente de la Cuenca de México, Thèse de Licence. Univ. Autón. de Chapingo, Mex., México.

- NEGENDANK (J.W.), EMMERMANN (R.), KRAWCZYK( R.), MOOSER (F.), TOBSCHALL (H.), WERLE (D.), 1985. – Geological and geochemical investigations on the Eastern Transmexican Volcanic Belt. *Geof. Int.*, vol. 24-4 : 477-575.
- NIMLOS (T.M), 1989. – The density and strength of Mexican tepetate (duric materials). *Soil Science*, 147 (1) : 23-27.
- OLIVER (J.E.), 1973. – *Climate and man's environment. An introduction to applied climatology. Part III: Climates of the past and climatic changes.* John Wiley & Sons : 315-394.
- QUANTIN (P.) et GEISSERT (D.), 1988. – Características químicas y mineralógicas de un andosol y de un suelo ferralítico de Xalapa, Veracruz, Mexico. Inireb, Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Ver. México, 24 p.
- ROBIN (C.), CANTAGREL (J.M.), 1982. – Le Pico de Orizaba (Mexique) : Structure et évolution d'un grand volcan andésitique complexe. *Bull. Volcanol.*, vol. 45-4 : 299-315.
- ROSSIGNOL (J.P.) et CAMPOS (A.), 1987. – Los tepetates de la zona Centro de Veracruz. In : *Uso y manejo de los tepetates.* J.F. Ruiz F. ed., Univ. Auton. Chapingo, Depto. Suelos, México : 38-49
- RUIZ (F. J.F.), 1987. – *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* Depto. de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Mex., México.
- THIRY (M.) et MILLOT (G.), 1987. – Mineralogical forms of silica and their sequence of formation in silcretes. *Journal of Sedimentary Petrology* 57(2) : 343-35.
- THIRY (M.) et MILNES (A.R.), 1991. – Pedogenic and groundwater silcretes at Stuart Creek Opal field, south Australia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61(1) : 111-127.
- THIRY (M.), SCHMITT (J.M.), TRAUTH (N.), COJEAN (R.) et TURLAND (M.), 1983. – Formations rouges "sidérolithiques" et silicifications sur la bordure nord du Massif Central. *Rev. de Géol. Dyn. et de Géogr. Physique*, 24(5) : 381-395.
- WERNER (G.), 1986. – Los suelos en el estado de Tlaxcala, altiplano central mexicano. Investigaciones relacionadas con su desarrollo, extensión, erosión y su utilización bajo la influencia de actividades agrícolas en 3 000 años. Centro Estud., Univ. Aut. Tlaxcala, Tlax., México, 132 p.