

L'INDURATION DES MATERIAUX VOLCANIQUES PYROCLASTIQUES EN AMERIQUE LATINE: PROCESSUS GEOLOGIQUES ET PEDOLOGIQUES

**Endurecimiento de Materiales Volcánicos Piroclásticos en América Latina:
Procesos Geológicos y Edafológicos**

**The Induration of Volcanic Pyroclastic Materials in Latin America:
Geological and Pedological Processes**

Paul Quantin

ORSTOM, Bondy, Francia.

Mots clefs: Matériaux pyroclastiques, Horizons indurés, Induration, Tepetate, Talpetate, Cangahua, Fierrillo, Tuf, Fragipan, Duripan, Croûte calcaire, Processus géologique, Processus pédologique, Amérique Latine.

Palabras clave: Materiales piroclásticos, Horizontes endurecidos, Enduración, Tepetate, Talpetate, Cangahua, Fierrillo, Toba, Fragipan, Duripan, Costra calcárea, Proceso geológico, Proceso pedológico, America Latina.

Key words: Pyroclastic materials, Indurated horizons, Induration, Tepetate, Talpetate, Cangahua, Fierrillo, Tuff, Fragipan, Duripan, Lime-crust, Geological process, Pedological process, Latin America.

Masaya, à l'origine des talpetates, a précédé la pédogénèse. Dans la vallée de Mexico, la formation d'un fragipan, horizon de sol faiblement silicifié appelé tepetate, s'est peut-être initiée lors du dépôt de cendres, puis poursuivie pendant la pédogénèse. Près de Xalapa (Veracruz, Mexique), la dégradation d'un sol argileux en duripan très siliceux est vraiment pédogénétique. Tandis qu'en Equateur le processus pédologique d'encroûtement calcaire, qui indure la cangahua à la base d'un sol, serait postérieur à la formation d'un tuf. Mais au Chili, c'est un processus pédologique qui cimente par des oxydes de fer, la base d'un andosol en milieu rédoxique, formant le fierrillo.

RESUME

Cet article a pour but de montrer que l'induration de certains matériaux pyroclastiques dans des sols d'Amérique Latine peut être due à un processus, soit géologique, soit pédologique ou les deux successivement. Après un rappel sur les propriétés d'un tuf volcanique, il montre des exemples de divers processus d'induration. Au Nicaragua, la formation du tuf palagonitisé de

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo mostrar que el endurecimiento de ciertos materiales piroclásticos en los suelos de América Latina, puede deberse a un proceso geológico, o pedológico o ambos. Después de la revisión de las propiedades de una toba volcánica, se presentan ejemplos de diferentes procesos de

endurecimiento. En Nicaragua, la formación de la toba palagonitizada de Masaya, origen de los talpetates, precedió a la pedogénesis. En el valle de México, la formación de un fragipan, horizonte de suelo débilmente silicificado, llamado tepetate, pudo tal vez, empezar al momento de la formación del depósito de cenizas, para luego seguir durante la pedogénesis. Cerca de Xalapa (Veracruz, México), la degradación de un suelo arcilloso a duripan muy silíceo, es realmente un proceso pedogenético. Mientras que en Ecuador, el proceso pedológico de encostramiento calcáreo, que endurece la cangahua en la base del suelo, sería posterior a la formación de una toba. Pero en los fierrillos de Chile, ocurrió un proceso pedológico que cementó con óxidos de hierro, la base de un andosol en medio redóxico.

SUMMARY

The aim of this paper is to show that the induration of some pyroclastic materials in the soils of Latin America could be due to a process either geological or pedological, or both successively. The properties of volcanic tuff are reviewed and some examples of various induration processes are given. In Nicaragua, the formation of the Masaya palagonitized tuff, from which the talpetate is derived, preceded pedogenesis. While in the Mexico Valley, the formation of a fragipan, a weakly silicified soil horizon, known as tepetate, probably began during the ash deposition and increased during the pedogenesis. Near Xalapa (Veracruz, Mexico), the degradation of a clay soil to a highly siliceous duripan is truly pedogenetic. Whereas in Ecuador, the lime encrusting pedological process which indurated the cangahua at the bottom of soils, could be subsequent to a tuff formation. But in Chile, under redox conditions, a pedological process develops cementing by iron oxides at the lowest part of andosols profiles forming a hardpan known as fierrillo.

INTRODUCTION

Les dépôts volcano-sédimentaires de projections ou de coulées pyroclastiques sont parfois consolidés sous forme de brèches, ignimbrites, ou tufs (Fisher et Schmincke, 1984). Les sols formés sur des matériaux pyroclastiques présentent aussi parfois des horizons indurés. En Amérique Latine ces formations superficielles sont connues régionalement sous diverses appellations: fierrillo ou cangahua au Chili, cangahua au Pérou et en Equateur, hardpan en Colombie, talpetate au Nicaragua, au Salvador et au Honduras, tepetate au Mexique. Les pédologues les rencontrent plus fréquemment en climat à longue saison sèche qu'en climat humide. Ils observent une cimentation par de la silice et, ou, du calcaire, plus rarement des oxydes de fer. C'est pourquoi ils attribuent l'induration à un processus pédologique. Les géologues au contraire pensent à un processus géologique, antérieur à la pédogénèse. En fait, de nombreux cas sont ambigus, notamment en Equateur, au Nicaragua et au Mexique (Nimlos, 1987; Dubroeuq *et al.*, 1989; Prat, 1991). Ils posent le problème de l'origine du ciment: processus géologique ou pédologique? Mais, dans certains cas les deux processus se sont succédés, ajoutant ainsi à la confusion des faits. L'objet de cet exposé est de poser le problème, et d'introduire plusieurs travaux présentés dans ce même ouvrage qui apporteront des éléments de réponse à ce débat.

Nous traiterons successivement du processus géologique de formation d'un tuf pyroclastique et de son impact dans un sol au Nicaragua, puis de divers processus pédologiques de cimentation par de la silice, du calcaire ou des oxydes de fer, au Mexique, en Equateur et au Chili.

PROCESSUS GEOLOGIQUE, FORMATION D'UN TUF PYROCLASTIQUE

Les tufs pyroclastiques étant semblables à un grand nombre d'horizons indurés observés dans

les sols volcaniques, il importe d'en reconnaître les propriétés originales.

Définition et Propriétés d'un Tuf Pyroclastique

D'après Fisher et Schmincke (1984), un tuf pyroclastique est une cendre consolidée, dont le diamètre des clastes (fragments de lave, de verres ou de phénocristaux volcaniques) est < 2 mm. Il peut contenir quelques éléments grossiers (cinérite accrétonnée, lapilli). Il comporte une matrice de clastes très fins ($< 0,1$ mm) de verres et microlites, cimentés entre eux, et des sables grossiers de lapilli vitreux et de phénocristaux. La matrice et les verres peuvent être altérés s'il s'agit d'une éruption hydromagmatique (éruption avec formation de vapeur d'eau), ou inaltérés s'il s'agit d'une nuée ardente (éruption avec intervention de gaz chauds).

Le ciment des tufs peut être dû à une fusion superficielle des verres au moment du dépôt, ou à leur altération pelliculaire en des produits amorphes isotropes, d'opale ou de palagonite, voire des minéraux argileux ou des zéolites. En outre, en milieu lacustre ou marin, la diagenèse forme des carbonates. La genèse de ces minéraux doit donc être distinguée de celle consécutive ultérieurement de la pédogenèse.

Exemple du Tuf Palagonitisé de Masaya, Nicaragua

Les sols volcaniques de la région de Managua présentent un ensemble d'horizons indurés, appelés localement "talpetate". Les pédologues, notamment Marin *et al.* (1971), le considéraient comme un "duripan", c'est à dire le produit d'un processus pédologique d'altération de cendres basaltiques, puis de silicification. Ensuite les géologues notamment Bice (1985), les ont rattachés à la formation du tuf basaltique de Masaya. Prat (1991) vient de montrer qu'il s'agit d'un tuf hydromagmatique, émis il y a environ 2 000 ans. Ce tuf se caractérise en effet par une matrice limoneuse et cimentée, l'abondance de clastes vitreux altérés en palagonite et la présence de nodules de "cinérites accrétonnées" comme

le montrent Prat et Quantin (1991) dans leur travail intitulé "Origen y génesis del talpetate", publié dans ce même volume.

Dans ce cas il est possible de distinguer les propriétés du tuf originel des traits pédologiques qui l'ont modifié. Ceux-ci consistent surtout en une fissuration et une pénétration biologique, qui permettent à une nouvelle altération, mais superficielle, de se développer, ainsi qu'un processus d'illuviation d'argiles ou d'hydroxydes (Fe, Al, Mn). Alors que les argiles smectiques proviennent de la palagonite, il se forme de nouveaux minéraux argileux: halloysite en situation de piémont et climat semi-humide; allophane et gibbsite en amont, climat humide et dans les andosols. La palagonite héritée ne s'altère qu'en climat très humide.

PROCESSUS PEDOLOGIQUE, HORIZONS DE SOLS INDURES

Nous aurons à différencier les cas où comme précédemment la pédogenèse se surimpose à la volcanogenèse et consolide un sédiment pyroclastique partiellement altéré, de ceux où un sol se transforme et produit lui-même son ciment, siliceux, calcaire ou ferrugineux. Les pédologues distinguent selon leur degré d'induration les "fragipans" matériau dur à l'état sec mais friable à l'état humide, des "duripans" qui demeurent toujours durs.

Silicification Légère en Fragipan d'une Cinérite Altérée: Exemple de Certains Tepetates de Texcoco, Mexico

Sur le versant occidental de la Sierra Nevada, en piémont, altitude de 2 500 à 2 800 m et climat sub-humide, les sols dérivés de cendres rhyolitiques présentent des horizons indurés à consistance de fragipan (Fig. 1). Il est sûr que le matériau originel provient de projections de cendres fines. Le ciment est riche en silice; mais le problème est de savoir si la consolidation est d'origine pédogénique ou volcanogénique.

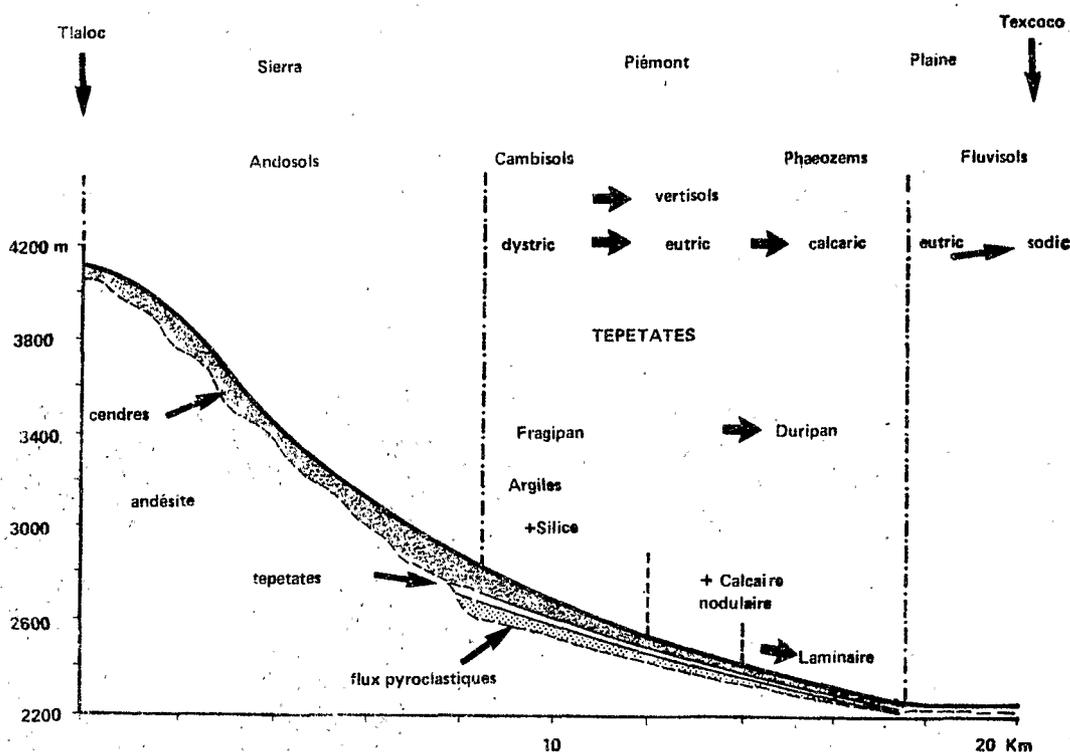


Figure 1. Climatoposéquence de sols et tepetates de Texcoco (Mexique).

D'après les travaux de Hidalgo (1991), certains horizons, près de la surface, manifestent encore les propriétés d'un tuf fin: matrice dense et cimentée, clastes volcaniques abondants et peu altérés, arrangement porphyrique du squelette, cimentation discrète (Fig. 2a, b); auxquelles se surimposent quelques traits de la pédogenèse; fissuration, tubes biologiques, quelques revêtements argileux. Dans d'autres horizons, plus en profondeur, les traits pédologiques sont plus marqués: réorganisation plasmique de la matrice, revêtements de ferri-argilanes dans les vides (Fig. 2c, d), formation de nodules (calcaires ou ferro-manganiques dans la matrice); des

silicifications y sont plus évidentes, à la surface des revêtements argileux, vers la base du profil.

La présence de silice "libre" dans la matrice argilo-limoneuse est certaine. Mais elle est peu abondante (quelques pourcent) dans la partie supérieure et moyenne du profil. Elle est plus abondante (10 à 20%) dans la partie profonde; où elle est évidente dans les revêtements argileux "éclaircis" (Fig. 2e, f); mais une part importante, sous forme d'opale-cristobalite, demeure diffuse dans la matrice. Si le rôle de la pédogenèse est certain, on peut cependant se demander si la volcanogenèse n'a pas contribué préalablement à la consolidation.

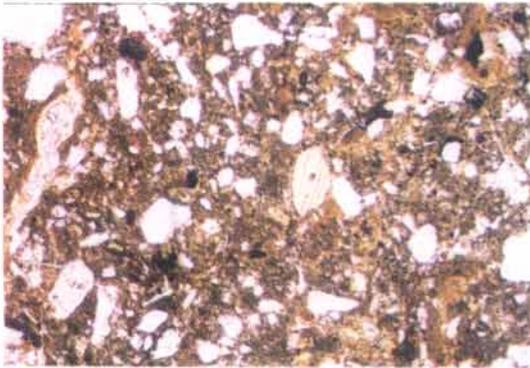


Figure 2a. Matrice dense porphyrosquelique L.N.

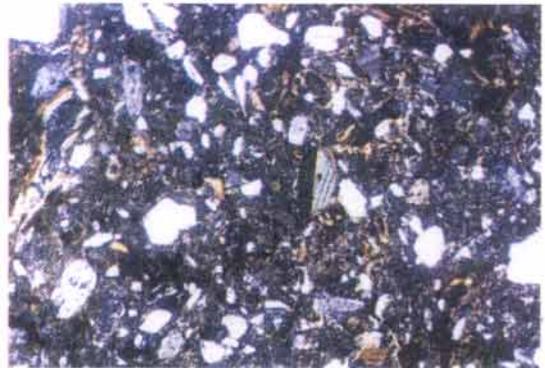


Figure 2b. Matrice dense porphyrosquelique L.P.

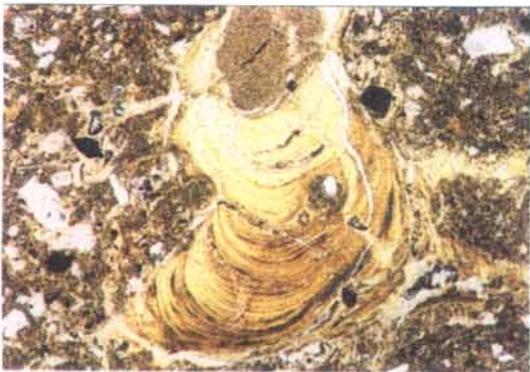


Figure 2c. Ferriargillane laminaire L.N.

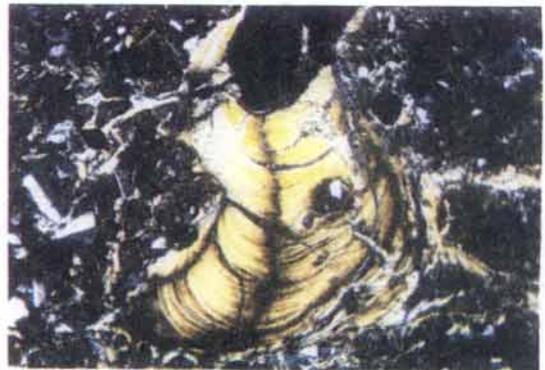


Figure 2d. Ferriargillane laminaire L.P.



Figure 2e. Revêtement argileux silicifié L.N.



Figure 2f. Revêtement argileux silicifié L.P.

Figure 2. Microscopie de tepetate faiblement silicifié (fragipan) de Texcoco (Mexico), d'après Hidalgo (1991); vues en lumière naturelle (L.N.) et polarisée (L.P.).

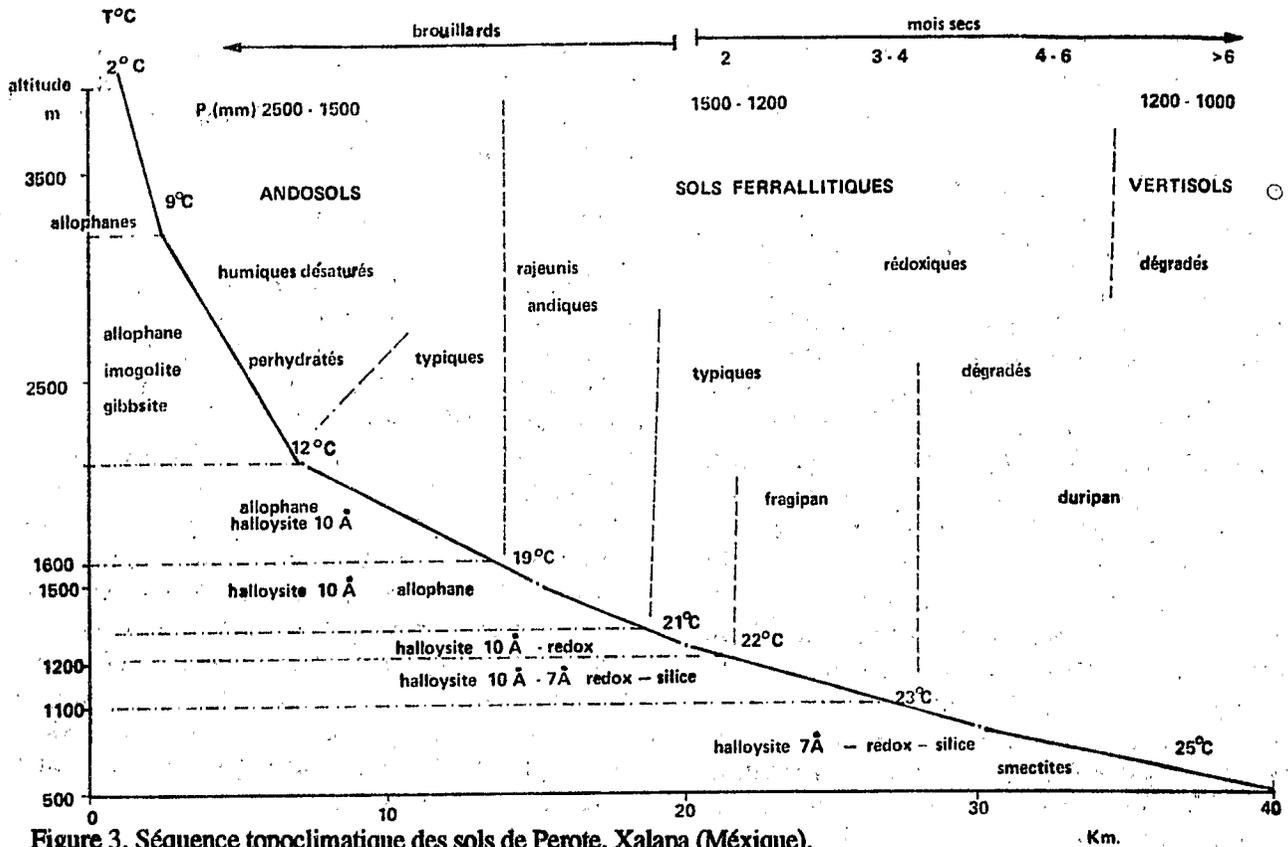


Figure 3. Séquence topoclimatique des sols de Perote, Xalapa (Mexique).

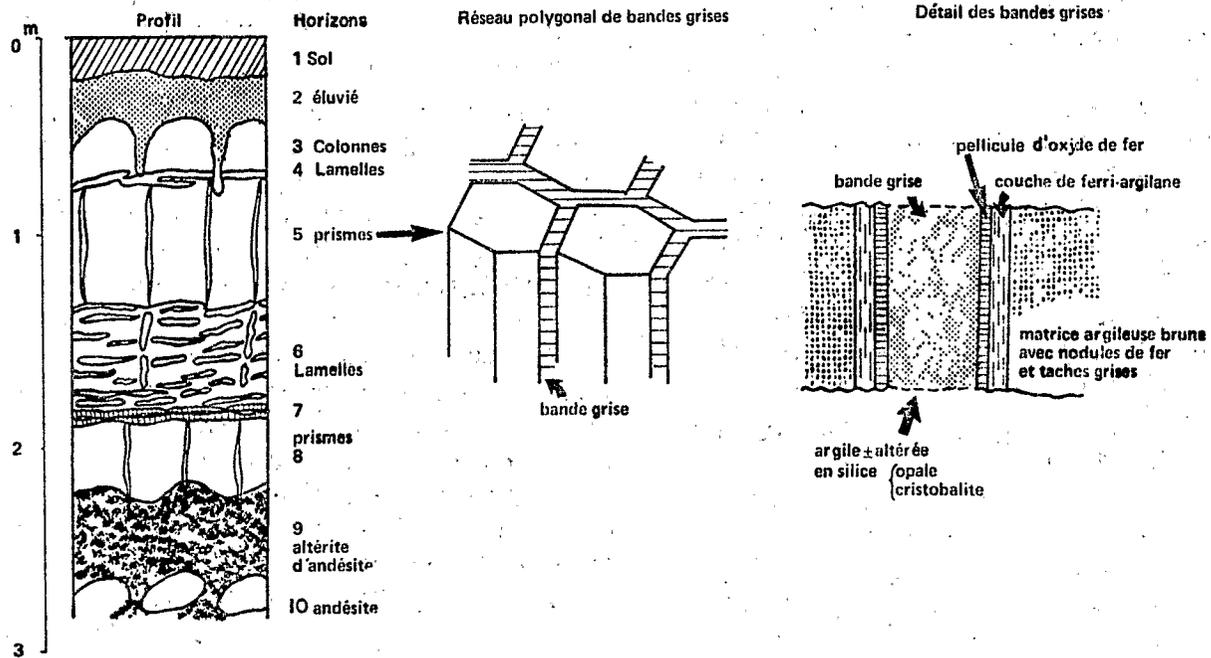


Figure 4. Dégradation d'un sol ferrallitique à halloysite; altération d'argiles et silicification, Xalapa (Mexique).

Silicification Forte en Duripan, par Dégradation d'un Sol Argileux: Exemple des Tepetates de Xalapa de Veracruz, Mexique

Des horizons indurés, appelés localement "tepetates", sont observés dans une climotoposéquence de sols, sur le versant S.E. du Cofre de Perote jusqu'à Xalapa de Veracruz (Dubroeuq *et al.*, 1989). Cette séquence (Fig. 3) comporte successivement, du sommet (4,000 m) vers l'aval (800 m); des andosols, en climat per-humide; des sols ferrallitiques argileux à halloysite, en climat humide; des sols argileux dégradés, à duripan silicifié, en climat à saison sèche marquée. Une transition entre sols ferrallitiques et sols dégradés consiste dans le développement de l'hydromorphie à la partie inférieure du sol; celle-ci se marque par un réseau orthogonal de bandes grises bordées d'une frange rouge vers la matrice brune (Fig. 4). Ce processus accompagne un mouvement d'éluvation-illuviation d'argiles. Une dégradation, suivie de silicification, augmente de l'amont vers l'aval et vers la base du sol (Campos *et al.*, 1990).

Au début, elle se développe clairement à la surface des prismes, en bordure des fentes de retrait et des tubes biologiques. Il y a dégradation des ferri-argilanes ou de la matrice argileuse, laissant un résidu de limon gris siliceux. Il s'agit d'un processus saisonnier de "ferrolyse" (Brinckmann, 1970), qui provoque une forte acidification à la surface des argiles, la dissolution de l'alumine et la concentration de silice résiduelle, d'abord sous forme de gel, puis celui-ci cristallise irréversiblement en cristobalite. Au début, la silicification n'est que superficielle, formant un fragipan, puis elle gagne la matrice et forme un duripan.

Dans ce cas le rôle de la pédogenèse est primordial, même s'il demeure encore des verres et minéraux de cendres rhyolitiques dans la partie supérieure du sol. Les propriétés du matériau originel ont quasi disparu. Il y a eu réorganisation de la matrice argileuse par pédoplasma-tion, puis sa dégradation et sa silicification. Les traits pédologiques abondent; eux-mêmes sont dégradés et silicifiés.

Carbonatation Encroûtement Calcaire d'une Cinérite Altérée: Exemples de la "Cangahua" d'Equateur et de Tepetate à Encroûtement Laminaire de la Vallée de Mexico

La cangahua en Equateur

La cangahua, est une formation superficielle de cendres volcaniques consolidées (tuf), qui affleure dans la haute vallée interandine d'Equateur, entre 3,200 et 2,400 m d'altitude. Pour Colmet-Daage *et al* (1969;1973), il s'agit de deux séries superposées de tufs volcaniques (dacitique et basaltique), qui ont subi une altération variable dans les sols selon leur position dans une climotoposéquence (Fig. 5), à savoir de l'amont perhumide vers l'aval subaride: andosols allophaniques, bruns andiques à halloysite, mollisols à smectite et encroûtement calcaire. L'encroûtement calcaire à la surface du tuf caractérise la cangahua la plus dure; il se développe à l'aval de la séquence en climat subaride (P-1 000 à 800 mm).

C'est pourquoi Winckell et Zebrowski (1990, non publié) pensent que l'induration des cinérites est conséquente de la pédogenèse; ils précisent l'âge des matériaux originels: 17,000 à 40,000 BP.

En réalité, la formation de la cangahua est semblable à celle du tepetate de la Vallée de Mexico. A l'aval de la séquence, la cangahua se présente comme un tuf fin, massif et prismé; celui-ci est un peu altéré et en surface il est encroûté de calcaire, qui pénètre entre les fentes des prismes, dans les tubes biologiques et les fissures. La matrice demeure typiquement celle d'une cinérite consolidée; elle n'est que traversée par la pédogenèse, le long de fentes et de tubes. Les revêtements de calcite sont superficiels, signe d'un processus pédologique récent; ils peuvent recouvrir des ferri-argilanes, voire de fins revêtements silicifiés, signes d'une pédogenèse antérieure. Ce ne sont pas les carbonates, au plus 2% de la masse totale, qui sont responsables de la cimentation (Winckell et Zebrowski, 1990). Mais la matrice du tuf est riche en silice (rapport

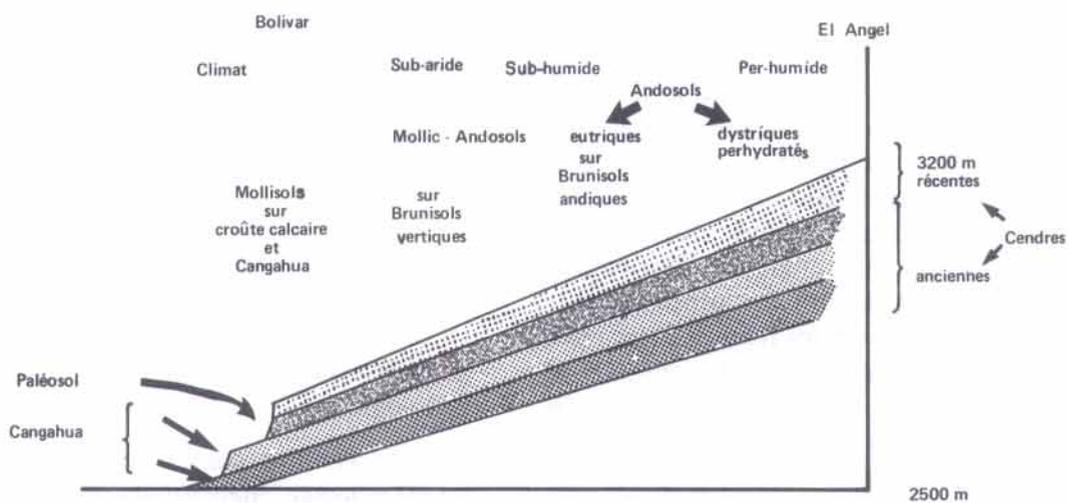


Figure 5. Climatoposéquence de sols et de cangahua (Equateur).



Figure 6. Ansol désaturé hydromorphe à horizon induré par des oxydes de fer, dit "fierrillo" de Lanco, (Chili).
 a. Vue du profil, l'horizon induré est à la base.
 b. Détail d'un fragment de "fierrillo".

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol. de 4 à 6) et pourrait comporter un ciment discret d'opale, celui-ci serait plutôt contemporain de la volcanogénèse.

Le tepetate à encroûtement calcaire laminaire de la Vallée de Mexico

Le tepetate à encroûtement calcaire laminaire, est une formation de tuf induré qui affleure sur le glacis bordant le lac de Texcoco; c'est à dire à l'aval de la climo-toposéquence de la Vallée de Mexico (Fig. 1), en climat subaride (P: 600 à 700 mm). A la surface du tuf, des lamelles entrecroisées de calcaire, englobent des lentilles de tuf encore peu altéré; en profondeur le calcaire pénètre seulement les fissures et les tubes biologiques. La matrice du tuf conserve sa structure originelle (Lacroix, 1991). La calcite dans les fissures recouvre des revêtement siliceux. Donc la carbonatation est un processus pédologique récent, voire aussi sédimentaire en bordure du lac (présence d'algues encroûtantes). Tandis que la consolidation de la matrice du tuf pourrait être due à la volcanogénèse.

Duripan Ferrugineux à la Base d'une Cinérite Altérée: Exemple du "Fierrillo" au Chili

Un horizon induré par des oxydes de fer, appelé "El Fierrillo", est observé à la base de certains andosols du Chili. Ces sols, appelés localement "ñadi" dérivent de cendres basaltiques récentes qui recouvrent un dépôt fluvio-

glaciaire (Wright, 1965). Une nappe phréatique fluctuante cause une hydromorphie variable à la base du sol, qui provoque l'accumulation des oxydes de fer, puis leur induration. C'est donc un processus pédologique secondaire dans un andosol. Cet horizon induré (Fig. 6) est comparable à un "alios ferrugineux" dans un sol podzologique hydromorphe. On note que l'accumulation des oxydes de fer est accompagnée de revêtements isotropes d'argile ou de silice.

CONCLUSION

Les horizons indurés dans les sols volcaniques peuvent avoir deux origines, volcano-génique ou pédologique.

Dans certains cas l'origine volcanique d'un tuf est évidente. Mais souvent elle paraît ambiguë dans les sols, car la pédogenèse se surimpose; elle contribue soit à réduire le ciment du tuf en climat humide, soit à le conserver en climat subaride, et même à y ajouter un apport de silice ou de calcaire, qui renforce l'induration.

Cependant l'impact primordial de la pédogenèse est évident dans deux cas: la dégradation d'un sol argileux en climat subhumide conduit à une silicification et induration du sol; ou un régime hydromorphe variable en climat humide contribue à la formation d'un ciment ferrugineux à la base du sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BICE, D.C. 1985. Quaternary stratigraphy of Managua, Nicaragua: correlation and source assignment for multiple overlapping plinian deposit. *Geol. Soc. Am. Abstracts* 96: 553-566.

BRINCKMANN, R. 1970. Ferrolisis, a hydro-morphic soil forming process. *Geoderma* 3: 199-206.

CAMPOS, A. y D. DUBROEUCQ. 1990. Formación de tepetates en suelos volcánicos provenientes de las alteraciones de materiales volcánicos. *Terra* 8: 137-147.

COLMET-DAAGE, F., C. DE KIMPE, M. DELAUNE, G. SIEFFERMANN, J. et M. GAUTHEYROU, G. FUSIL et M. KOUKOU. 1969. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 3^{ème} partie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* VII, 4: 495-560.

COLMET-DAAGE, F., M. DELAUNE, G. FUSIL, O. YEPEZ, N. ESPINOZA et J. TRICHET. 1973. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 3^{ème} partie. *Mém. ORSTOM Antilles, Fort de France, France.* 45 p.

DUBROEUCQ, D., P. QUANTIN y C. ZEBROWSKI. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7: 3-12.

FISCHER, R. V. and H.V. SCHIMCKE. 1984. *Pyroclastic rocks.* Springerl. Verlag. Heidelberg. 472 p.

HIDALGO, C. 1991. Contribution à l'étude de sols volcaniques indurés (tepetates) de la région de México: cimentation, induration. DEA. Pédologie, Univ. Nancy I, Nancy, France. 57 p.

LACROIX, E. 1989. Etude microscopique d'une croûte calcaire sur "tepetate" (Altiplano du Mexique). DEA Pédologie, Univ. Nancy I, Nancy, France. 27 p.

MARIN, C. E. J., G. E. UBEDA y O.J. VIRAMONTE. 1971. Contribución al conocimiento de la génesis del "talpetate". 3^{ème} Réun. Geol. Amér. Centr. San José, Costa Rica. 31 p.

NIMLOS, T.M. 1987. La nomenclatura de horizontes endurecidos en suelos de cenizas volcánicas. pp. 10-18. *In:* J.F. RUIZ F. (ed). *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* UACH, Depto. Suelos, Mexique.

PRAT C. 1991. Etude du "talpetate" de la région Centre Pacifique du Nicaragua, Thèse Univ. Paris VI, Paris, France. 320 p.

PRAT, C. y P. QUANTIN. 1992. Origen y génesis del "talpetate", horizonte endurecido de los suelos volcánicos de la región Centro Pacífico de Nicaragua, Publicado en este volumen.

WINCKELL, A. et C. ZEBROWSKI. 1990. La cangahua. Note manuscrite inédite, ORSTOM, Paris, France.

WRIGHT, C. A. 1965. The volcanic ash soils of Chile. Report to Government of Chile. FAO Rep. n° 2017, Rome. 201 p.