

**Les tepetates de Xalapa, Veracruz (Mexique) :
une induration pédologique dans des sols d'origine volcanique**

The tepetates from Xalapa, Mexico : a pedologic hardening process in volcanic soils

Structure et transformation de la couverture pédologique

Adolfo CAMPOS

Microscopie et minéralogie des indurations

Didier DUBROEUCQ

Effets sur le paysage et chronologie du phénomène

Daniel GEISSERT

Structure et transformation de la couverture pédologique

Adolfo CAMPOS

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

RÉSUMÉ

Les observations effectuées à partir d'une coupe de 100 m de long montrent que les horizons compacts et indurés (tepetates) prennent naissance dans un sol ferrallitique argileux à halloysite. Les résultats des mesures de la texture et de la densité apparente confirment qu'il existe une perte de plasma et une augmentation relative des sables et des limons dans ces horizons. Elle conduit à un effondrement irrégulier des structures, à un amincissement des horizons et une augmentation consécutive de la densité apparente. L'analyse, durant la période pluvieuse, de l'eau libre du sol, a donné des teneurs constantes et notables en silice qui augmentent en fin de saison humide. Les teneurs en aluminium et en fer sont en général inférieures, mais très variables et étroitement liées aux fortes précipitations. On enregistre dans les eaux des pH faiblement acides et de faibles concentrations en cations. Les teneurs en silice sont les plus fortes à proximité des horizons laminaires et elles jouent un rôle primordial dans la formation de ces niveaux indurés.

MOTS CLÉS : *Tepetates – Silicification – Couverture pédologique – Transformation – Mexique.*

ABSTRACT

THE SOIL MANTLE STRUCTURE AND ITS EVOLUTION

Field observations along a 100 m cut show the formation of compacted and hardened horizons (tepetates) from a ferrallitic halloysite clay soil. Results of particle size analysis and field density measurements evidence a lateral fine plasma destruction with correlative increment of sand and silt, so that soil structure collapses irregularly, horizons get thinner and field density increases. The internal circulating waters were analyzed during the rainy season. Waters show notable and permanent contents of silica with an augmentation at the final of the season, while aluminium and iron concentrations are lower and closely related to the intense

rains. These solutions are slightly acid and cations exist in very small quantities. Silica contents are always higher in the waters near the laminar horizons and are supposed to play an important role in the hardening process.

KEY WORDS : *Tepetates* – Soil mantle – Silicification – Soil transformation – Mexico.

RESUMEN

ESTRUCTURA Y TRANSFORMACION DE LA CUBIERTA PEDOLOGICA

Las observaciones en un corte de 100 m de largo mostraron la formación de horizontes compactos y endurecidos (tepetates) a partir de un suelo ferralítico arcilloso con haloisita. Los resultados de textura y densidad aparente evidencian la destrucción del plasma fino con un aumento de los limos y arena, lo que ocasiona el colapsamiento de las estructuras, el adelgazamiento de los horizontes y el incremento de la densidad aparente. El análisis de las aguas internas del suelo en el período de lluvias, muestra notables contenidos de silicio que se acentúan al final del período. Las concentraciones de aluminio y hierro son menores. También las soluciones registran pH ligeramente ácidos y los cationes se exportan a bajas concentraciones. Los contenidos de silicio son mayores en los horizontes laminares y tienen una participación importante en la formación de los estratos endurecidos.

PALABRAS CLAVES: *Tepetates* – Cubierta pedológica – Silicificación – Transformación – México.

INTRODUCTION

Une probable silicification

Au Mexique, les formations indurées appelées "tepetates" sont des terres stériles et érodées. Elles se trouvent dans tout l'axe néovolcanique central depuis le Pacifique jusqu'à l'Atlantique, en région d'altiplano à climat sub-humide à sub-aride, où se manifeste une saison sèche toujours bien marquée. À cause d'une superficie très importante (30 700 km²), ces terres agricoles, dont une partie est traditionnellement reléguée en terrain de parcours pour le bétail, suscitent actuellement un regain d'intérêt. Leur récupération, en vue de les restituer à l'agriculture, permettrait en effet de pallier le déficit en espace cultivable et limiter les effets de l'érosion.

Les études agronomiques se sont donc orientées essentiellement dans ce but (RUIZ F., 1987 ; MIRANDA *et al.*, 1989), mais l'explication scientifique de la formation des tepetates demeure encore obscure, due sans doute à la multiplicité des formes d'induration et à la variété des matériaux volcaniques susceptibles de les engendrer (DUBROEUCQ, QUANTIN et ZEBROWSKI, 1989). Néanmoins plusieurs auteurs ont déjà étudié spécifiquement les tepetates.

WERNER (1986) distingue au moins cinq niveaux à accumulation de silice dans les sols sur cendres volcaniques de la région de Tlaxcala. Ces accumulations se localisent toujours à la base d'un horizon argilique. L'auteur rapporte également les analyses chimiques réalisées par MIEHLICH, ainsi que les études micromorphologiques de ALTMUELLER, par lesquelles il constate que le ciment du sol se compose d'un mélange non différenciable d'acide silicique (en forme de gel) et d'hallowite (produit de la cristallisation des allophanes).

NIMLOS (1989) mesure, dans une étude de quelques tepetates de Mexico, des densités apparentes de 1,00 à 2,11 g/cm³ et une résistance à la compression de 24,7 kg/cm². Il souligne que la compacité est la plus forte quand les carbonates s'ajoutent à la silice.

QUANTIN et GEISSERT (1988) précisent que les sols ferrallitiques de la région de Xalapa sont à hallowite. Ces sols se disposent dans le paysage à l'amont des tepetates (ROSSIGNOL et CAMPOS, 1987). À partir de cette observation, il a été admis que les tepetates proviennent des sols ferrallitiques et que la ferrolyse (BRINCKMANN, 1970 ; ESPIAU et PEDRO, 1983) pourrait intervenir dans la dégradation des argiles avec accumulation relative de silice, donnant naissance aux tepetates.

À la suite de ces résultats, il s'est avéré nécessaire de préciser comment apparaissent les tepetates au sein de la couverture pédologique et à quelle règle est soumise leur distribution dans le paysage. Dans ce but, le présent article montre la structure de la couverture pédologique sur le site où se forment les horizons compacts. Il précise également l'évolution géochimique du milieu à travers l'analyse saisonnière des eaux du sol.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Site d'étude

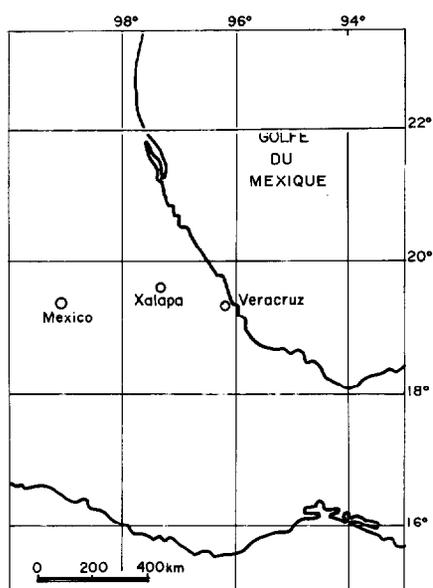


FIG. 1. – Carte de localisation
Location map

Les sols ont été étudiés à 5 km au nord-est de Xalapa (fig. 1), lieu-dit "el Sumidero" (19°32'35" nord, 96°52'30" ouest). Le substrat géologique se compose de plusieurs coulées superposées de laves basalto-andésitiques, orientées de nord-ouest à sud-est. La couverture pédologique a été analysée le long d'une coupe sur une distance de 100 m, orientée dans le sens de la coulée. Elle s'inscrit sur une portion de planèze intensément altérée sur 4 m de profondeur et recoupée par une entaille. La géométrie de la couverture pédologique en deux dimensions a été obtenue par la méthode de l'analyse structurale (BOULET *et al.*, 1982). La coupe transversale s'obtient par un levé topographique et la description de 25 profils le long de la coupe.

Prélèvements et analyses

45 échantillons de sol ont été prélevés pour détermination de la texture (à la pipette), de la densité apparente (à la paraffine) et de la densité réelle (au picnomètre). Dans 22 échantillons d'eau libre du sol, recueillis durant la saison des pluies de 1990, furent déterminés Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na et pH. Les eaux ont été prélevées à l'aide de tubes en plastique, à deux profondeurs : 50 cm et 230 cm. Le pH a été mesuré sur le terrain, postérieurement les eaux ont été acidifiées (3 gouttes de HCl 0,1N) et maintenues en réfrigérateur. Les dosages ont été effectués dans les laboratoires de géochimie de l'Orstom à Bondy, par spectrométrie d'absorption, et par spectrométrie d'émission de plasma sur spectromètre SOPRA avec torche Philips.

RÉSULTATS

Existence d'une transformation latérale

Dans la coupe, la couverture pédologique se différencie de haut en bas en 9 horizons distincts :

- horizon superficiel *humifère* brun sombre ;
- horizon *éluvié* beige clair ;
- horizon *columnaire* brun clair ;
- horizon *concrétionné* ;
- horizon *prismatique* jaune vers la surface, brun vers la profondeur ;
- horizon de *plinthite* laminaire avec des veines argileuses grises ;
- horizon *laminaire* très compact appelé "duripan" à la base de la plinthite ;
- horizon *prismatique* brun ;
- horizon d'altération *polyédrique* brun-rouge.

La disposition des horizons apparaît dans la figure 2. Depuis l'altérite jusqu'aux horizons columnaires on observe une structure en strates ondulées, discontinues, qui diminuent d'épaisseur à mesure qu'elles se rapprochent de la surface. Le nombre des strates augmente sensiblement vers l'aval de la coupe. Vers la partie amont de la coupe se situent des sols argileux, proches des sols ferrallitiques, dans lesquels on ne distingue qu'un horizon prismatique peu différencié et un horizon de plinthite. La transformation prend naissance à la partie inférieure de ces sols argileux, à la base de l'horizon de plinthite, où s'individualise un horizon prismatique profond. Vers l'aval de la coupe, dans le sens général de la planèze, de nouveaux horizons

prismatiques se forment successivement à la base des profils. Seuls les horizons superficiels “humifères” et “éluviés” ne sont pas touchés par la transformation et ne varient guère au long de la coupe.

“fères” et “éluviés” ne sont pas touchés par la transformation et ne varient guère au long de la coupe.

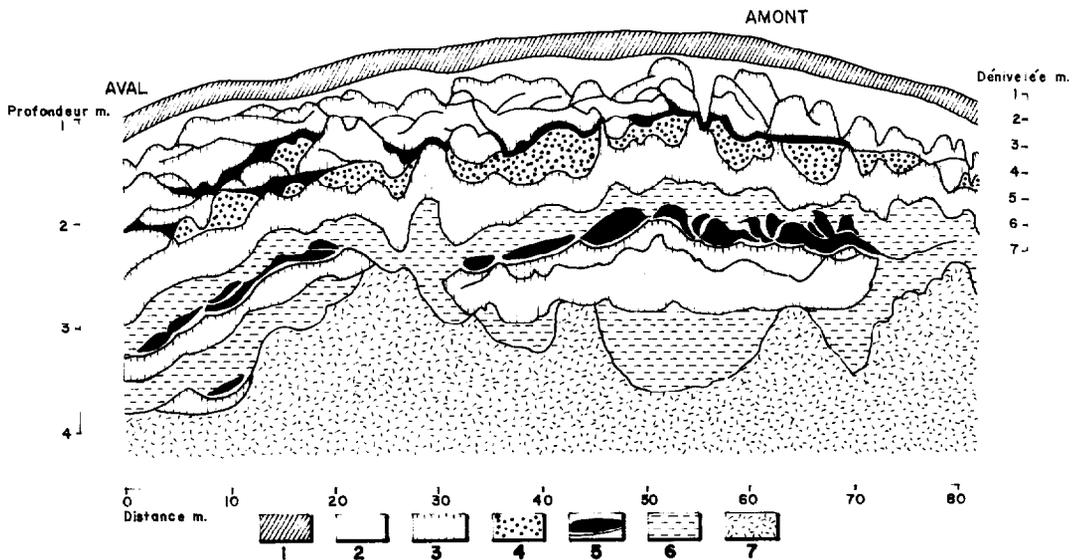


FIG. 2. – Coupe longitudinale de la couverture pédologique avec la représentation des horizons. 1 = humifère ; 2 = éluvié ; 3 = prismatique (hachuré large) et colonnaire (hachuré serré) ; 4 = concrétionné ; 5 = duripan ; 6 = plinthite laminaire ; 7 = polyédrique brun-rouge.

Cross section of a part of the soil mantle with its different horizons: 1= humic; 2= eluviated; 3= prismatic and columnar; 4= hard nodules; 5= duripan; 6= laminar plinthite; 7= red brown alterite.

Les sols les plus évolués, vers la partie aval de la coupe, se reconnaissent par leur plus grand nombre de strates superposées et les compacités les plus fortes. D’après la disposition des horizons, le processus se développe latéralement et il est plus prononcé, donc plus ancien, à l’aval de la planèze. Dans le temps nous avons alors une lente avancée du phénomène le long de la structure géologique, c’est-à-dire la coulée de lave.

Une transformation entre deux sols extrêmes

À chaque extrémité de la coupe on observe des sols totalement différents morphologiquement, qui semblent n’avoir aucune relation lorsqu’on les décrit séparément. Le sol initial, à l’amont, est un sol argileux à halloysite, de caractère ferrallitique. Il comporte les horizons suivants (fig. 3) :

- 000/015 cm humifère, brun sombre
- 015/040 cm grumeleux, brun clair
- 040/120 cm prismatique, brun, argileux, à sous-structure polyédrique
- 120/250 cm plinthite à taches grises, argileux
- 250/300 cm altération brun-rouge, polyédrique, argileux

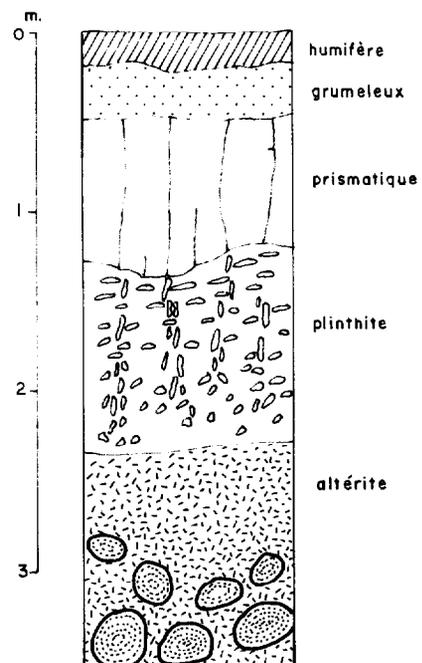


FIG. 3. – Schéma du sol ferrallitique à halloysite. *Sketch of the ferrallitic halloysitic soil.*

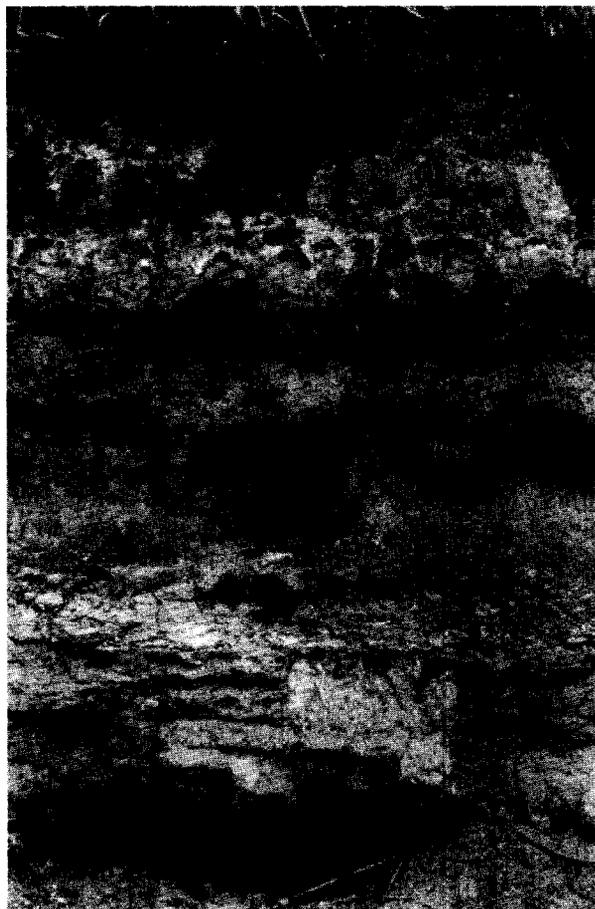


PHOTO 1 – Aspect du profil de tepetate montrant trois discontinuités horizontales à structure prismatique. General feature of the “tepetate” profile showing three horizontal layers of prismatic structures.

À l’aval on observe un sol appelé “tepetate”, caractérisé par l’importance de ses discontinuités horizontales (photo 1) : chaque couche de prismes est séparée de la couche sous-jacente par un duripan. Les parois des prismes montrent souvent des revêtements limoneux blancs durcis qui donnent parfois, en surface du sol, un dessin polygonal. De haut en bas on a le profil suivant (fig. 4) :

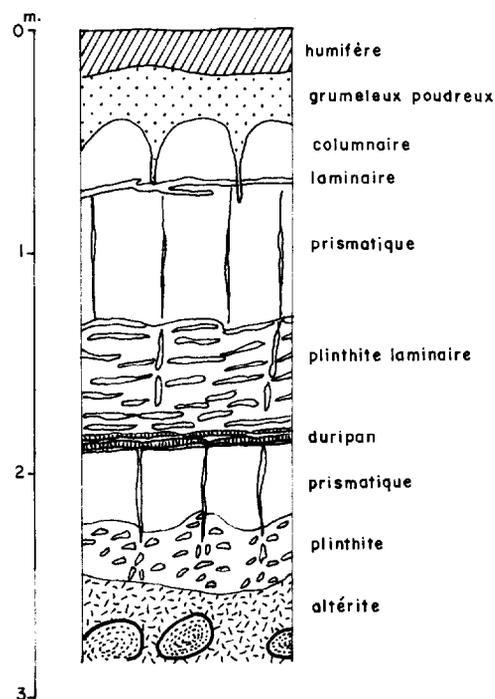


FIG. 4. – Schéma du sol dégradé appelé “tepetate”. Sketch of the degraded soil named “tepetate”.

- 000/020 cm humifère, brun sombre
- 020/050 cm poudreux, beige clair, sableux
- 050/080 cm columnaire, beige, limoneux, très compact en sec
- 080/085 cm laminaire, gris clair, sableux, concrétions aplaties, très dures
- 085/140 cm prismatique jaune, compact, nombreux nodules
- 140/190 cm plinthise laminaire à veines grises argileuses sub-horizontales
- 190/195 cm duripan, brun gris, très dur, constitué de strates horizontales de 2 à 3cm d’épaisseur séparées par des lits d’argile grise
- 195/230 cm prismatique brun, très compact
- 230/270 cm plinthise, brun à taches grises
- 270/300 cm altérite argileuse, brun-rouge, polyédrique, boules de roche altérée verdâtres.

Dans le premier profil les horizons ont tous une texture argileuse et passent progressivement de l’un à l’autre. Dans le second profil, au contraire, des horizons prismatiques blanchis et sablo-limoneux apparaissent séparés par des discordances horizontales très marquées.

**Texture et densité apparente :
Mise en évidence de la destruction des argiles**

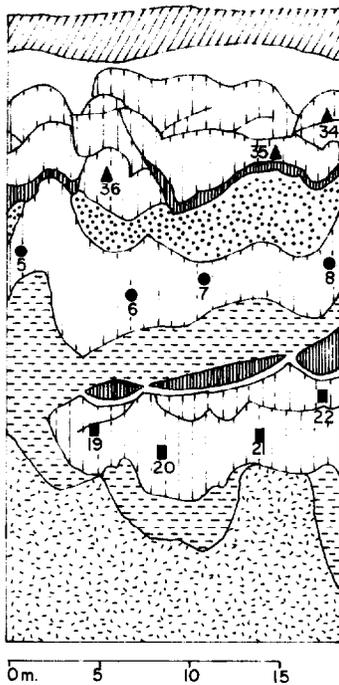


FIG. 5. – Portion de la coupe avec les sites des prélèvements pour les analyses physiques du sol.
Part of the cross section with sample sites for physical determinations.

La figure 5 montre sur une portion de coupe la localisation des prélèvements dans les prismes et les colonnes. Les mesures physiques correspondantes sont portées dans le tableau I.

TABLEAU I
Texture et densité apparente de quelques horizons prismatiques et colonnaires du tepetate
Particle size and field density in various sites of the columnar and prismatic tepetate layers

Éch. n°	Densité apparente	Argile %	Sable fin %	Limon fin %
36	1,53	28,80	34,60	20,05
35	1,56	23,65	31,73	26,65
34	1,49	47,35	7,96	30,55
5	1,56	27,75	13,60	39,45
6	1,41	36,95	9,00	32,15
7	1,45	28,15	14,60	35,95
8	1,31	34,95	11,90	29,10
19	1,70	24,80	17,42	35,85
20	2,10	19,00	26,00	30,80
21	2,08	13,10	26,07	30,80
22	2,28	19,75	28,80	27,40

Il existe une corrélation positive entre la densité apparente et la teneur en limon et sable fins, et une corrélation négative entre la densité apparente et la teneur en argile. Les prismes et colonnes de forte densité sont les plus pauvres en argile.

D'autre part, dans un même horizon, il existe de fortes variations de la densité apparente d'un endroit à l'autre de la coupe. Ces variations semblent en relation avec la taille des structures prismatiques. Les prismes courts offrent les plus fortes densités apparentes, alors que les structures hautes présentent une densité plus faible : dans celles-ci s'observe une macroporosité importante sous forme de vacuoles et de tubules, alors que les prismes courts et denses en sont dépourvus.

Par ailleurs on note que les densités les plus élevées se situent vers la profondeur du profil dans l'horizon prismatique brun (fig. 6), ce qui suggère un effet important du poids de la couverture de sol sur la compaction des structures prismatiques.

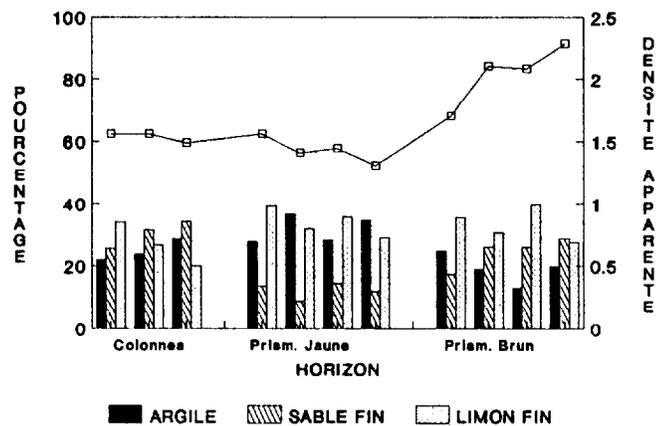


FIG. 6. – Relation entre texture et densité apparente dans les horizons prismatiques et colonnaires.
Relation between particle size and field density in the horizons with prismatic and columnar structures.

Ces résultats permettent d'interpréter la formation des horizons compacts de la manière suivante:

La dégradation des argiles et la dissolution du squelette dans les prismes crée une macroporosité importante (chenaux et cavités) qui entraîne une diminution de la densité apparente du matériau. L'édifice structural se maintient dans son volume initial tant qu'il subsiste suffisamment de plasma argileux. Mais lorsque la porosité devient très importante, on dépasse le seuil de résistance du matériau au tassement et l'édifice s'effondre avec, en conséquence, une nette augmentation de la den-

sité apparente. Ce point de rupture survient de façon discontinue et localisée, ce qui peut expliquer la forme ondulée des horizons.

La dynamique des éléments dans l'eau du sol

Il existe dans les profils deux niveaux principaux où se concentrent les eaux du sol : un premier à la base des horizons columnaires, un second plus profond dans les horizons de plinthite. Au cours de la saison 1990, les eaux ont été prélevées dans ces deux niveaux.

VARIATION SAISONNIÈRE DES ÉLÉMENTS MAJEURS : Si, Al, Fe

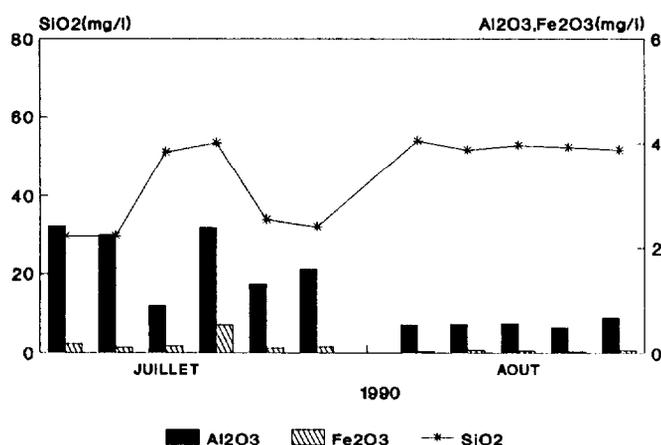


FIG. 7. – Comportement des éléments Si, Al, Fe dans les horizons columnaires (prof. 50 cm).
Variation in Si, Al, Fe contents in the draining solution in the columnar horizon (50 cm depth).

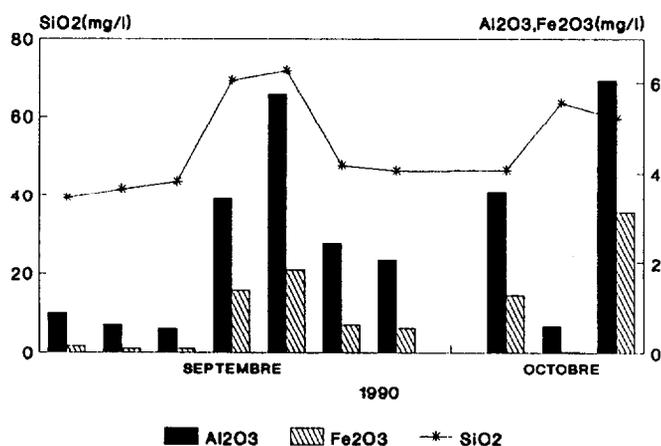


FIG. 8. – Comportement des éléments Si, Al, Fe dans les horizons de plinthite (prof. 230 cm).
Variation in Si, Al, Fe contents in the draining solution in the plinthic horizon (230 cm depth).

Les teneurs en silice dans les eaux varient globalement entre 30 mg/l et 70 mg/l. Elles sont relativement constantes quel que soit le volume des précipitations et augmentent en fin de saison pluvieuse (fig. 7 et fig. 8). Parmi les deux niveaux d'accumulation des eaux du sol, c'est dans la plinthite où l'on enregistre les plus fortes teneurs en silice. Les solutions du sol en profondeur en fin de saison humide, avec des pH inférieurs à 7 (fig. 10), sont donc les plus favorables à la précipitation de la silice.

Les teneurs en aluminium dans les eaux sont globalement faibles avec une forte variabilité, de 0,5 mg/l à 5 mg/l (fig. 7 et fig. 8). On observe peu de différence de concentration en aluminium entre les deux niveaux du sol, cependant les plus fortes teneurs s'observent dans les horizons de plinthite. Les dates des prélèvements aux fortes teneurs suivent de un ou deux jours une occurrence de fortes précipitations (tabl. II). Les concentrations en aluminium dans les eaux semblent donc liées directement au volume des pluies.

TABLEAU II

Teneurs en Al_2O_3 , Fe_2O_3 et SiO_2 enregistrées dans les eaux prélevées durant la saison 1990, en relation avec l'intensité des écoulements internes dus aux pluies : faibles (-), abondants (+)

Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂ draining water contents measured during the rainy season 1990 and related to the intensity of the soil water circulation due to the rain: weak(-), strong(+)

Éch.	Prof. cm	Pluie	Date	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ mg/l	SiO ₂
Su1	45	+	3/07	2,43	0,17	29,83
Su2	45	+	3/07	2,26	0,11	29,30
Su3	60	+	3/07	0,90	0,13	51,09
Su4	60	+	8/07	2,40	0,53	53,42
Su5	50	-	12/07	1,30	0,09	34,00
Su6	45	-	12/07	1,59	0,12	32,21
Su7	140	-	13/07	0,49	0,96	72,39
Su8	50	-	9/08	0,53	0,03	54,05
Su9	50	-	9/08	0,54	0,06	51,66
Su10	50	+	10/08	3,36	0,00	52,77
Su11	50	-	11/08	0,47	0,03	52,27
Su12	220	-	11/09	0,90	0,15	39,33
Su13	220	-	11/09	0,65	0,09	41,67
Su14	260	-	11/09	0,55	0,09	43,61
Su151	225	+	12/09	3,43	1,39	69,12
Su152	225	+	12/09	5,75	1,83	71,71
Su16	50	-	20/09	0,65	0,05	51,54
Su17	260	-	4/10	2,44	0,64	47,68
Su18	220	-	4/10	2,08	0,57	46,40
Su19	260	+	8/10	3,59	1,29	46,55
Su20	240	+	8/10	0,62	0,02	63,40
Su21	130	+	8/10	6,05	3,13	59,63

Le fer suit en général le même rythme que l'aluminium, mais avec des concentrations très inférieures (fig. 7 et fig. 8). Les teneurs varient entre 0,03 mg/l et 3 mg/l, avec des variations atténuées qui suivent l'occurrence des précipitations.

VARIATION SAISONNIÈRE DES BASES

La teneur en cations qui s'exportent par les eaux du sol est relativement faible.

Dans l'horizon colonnaire (fig. 9) les concentrations en calcium varient de 0,06 à 0,5 meq/l, celles de magnésium de 0,02 à 0,18 meq/l, tandis que dans l'horizon de plinthise elles sont nettement

plus faibles, 0,02 à 0,12 meq/l et 0,01 à 0,07 meq/l respectivement (fig. 10).

Les teneurs en sodium varient de 0,18 à 0,33 meq/l, celles du potassium de 0,00 à 0,03 meq/l, dans les horizons supérieurs colonnaires (fig. 9) comme dans les horizons inférieurs (fig. 10).

VARIATION SAISONNIÈRE DU pH

Le pH des eaux du sol varie entre 5,7 et 6,18 au long de la saison, avec une acidité plus faible (0,5 unités) et qui a tendance à s'accroître en fin de saison humide dans les horizons profonds (fig. 10). Cette variation suit celle de la teneur en silice dans les eaux des horizons profonds, bien que plus atténuée.

INTERPRÉTATIONS ET CONCLUSION

La structure de la couverture pédologique, mise en évidence par une coupe longitudinale, révèle l'existence d'un processus de transformation des sols formés dans des altérations de basalte andésitique. La transformation se propage latéralement, guidée par le sens d'écoulement des eaux internes du sol.

Elle débute dans un sol argileux à halloysite relativement homogène et conduit, à partir de la base du profil au niveau de l'interface avec le matériau d'altération, à la formation d'horizons prismatiques successifs qui finissent par se superposer. Chaque couche prismatique évolue ensuite vers l'aval en s'appauvrissant en argile, s'amincissant irrégulièrement (forme ondulée) en se densifiant, s'entourant de lamines silicifiées (duripans), et se rapprochant de la surface du sol.

La composition chimique saisonnière des eaux du sol montre qu'il existe une exportation des bases sous de faibles teneurs et une légère acidification du milieu. Elle montre également que la mobilisation de l'aluminium et du fer est associée au volume des précipitations et que ces éléments sont exportés sous de faibles concentrations. Quant à la silice, sa période de variation suit celle de la saison et sa concentration est proche de la saturation en fin de saison humide dans les horizons profonds. Ces données soulignent que les conditions sont favorables à une possible silicification, en particulier vers la base des profils.

Les mesures physiques montrent que la compaction du sol résulte de l'effondrement de l'édifice

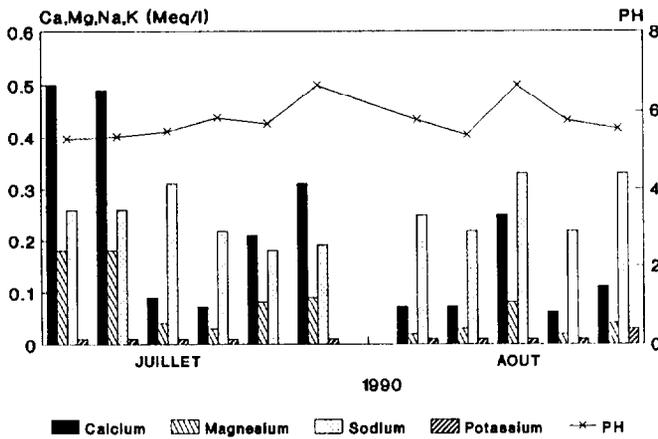


FIG. 9. - Comportement des bases et du pH dans les eaux de l'horizon colonnaire (prof. 50 cm).
Variation in cations content and pH in the draining water in the columnar horizon (50 cm depth).

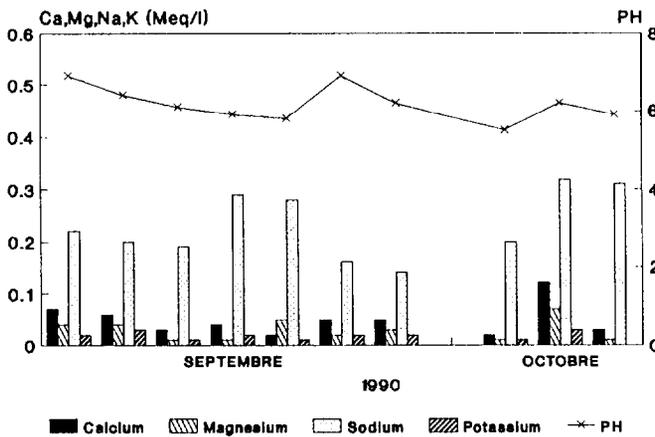


FIG. 10. - Comportement des bases et du pH dans les eaux des horizons de plinthise (prof. 230 cm).
Variation in cations content and pH in the draining water in the plinthic horizon (230 cm depth).

Les tepetates de Xalapa, Veracruz (Mexique) : une induration pédologique dans des sols d'origine volcanique

structural par tassement. Elle entraîne la disparition de la macroporosité formée préalablement dans les structures prismatiques par destruction du plasma argileux. La dégradation des halloysites est donc très probablement à l'origine du processus de libération de la silice dans la solution du sol. Comme les rapports atomiques Si/Al sont, dans les eaux, bien supérieurs à ceux de l'halloysite (tabl. I), l'enrichissement en silice se fait donc dans la solution du sol. Il est important de remarquer que la roche-mère est, paradoxalement, une roche basaltique modérément riche en silice ($\text{SiO}_2 = 57\%$).

La silicification est associée à un processus d'accumulation relative de la silice par rapport à l'aluminium dans les eaux du sol. En régime d'écoulement élevé le rapport Si/Al est faible, en régime d'étiage il est fort et peut atteindre 120. En outre nous avons vu que les teneurs en silice sont contrôlées par un phénomène saisonnier, alors que celles de l'aluminium sont contrôlées par le volume de chaque précipitation. Il est donc logique de penser qu'un climat à saisons contrastées facilite la mobilisation de la silice, alors qu'un climat à pluies abondantes et régulières facilite la mobilisation de l'aluminium.