

Effets des éruptions du volcan El Chichón (Mexique) sur les propriétés chimiques et minéralogiques de sols situés dans son voisinage

Paul QUANTIN (1) et Daniel GEISSERT (2)

(1) Pédologue Centre ORSTOM - 70, 74, route d'Aulnay - 93140 Bondy

(2) Géomorphologue INIREB - 91000 Xalapa Veracruz, Mexique

RÉSUMÉ

Cet article présente une analyse des caractères chimiques et minéralogiques de sols de la région du Volcan El Chichón : un sol brun-andique et trois sols ferrallitiques. Il met en relief les effets, sur les propriétés de ces sols, de plusieurs éruptions volcaniques, les unes relativement anciennes (600, 1250 et 1700 B.P.), les autres toutes récentes (entre le 28 mars et le 4 avril 1982).

Les sols bruns de la Sierra, autour du volcan, se développent dans des matériaux pyroclastiques rhyo-dacitiques, qui ont recouvert les marnes du Tertiaire. Ils s'apparentent à des sols bruns eutrophes tropicaux, mais présentent aussi des caractères andiques. Dans la fraction argileuse prédomine l'hallowaysite, et un peu d'allopmane. Le sol superficiel a été légèrement acidifié par un dépôt décimétrique de cendres riches en sulfates récemment émises par El Chichón.

Les sols ferrallitiques, dérivés de sédiments plio-quaternaires, prédominent dans la plaine côtière, au nord du volcan. Ils sont constitués principalement de kaolinite et de goéthite, mais ils contiennent aussi un peu de gibbsite. L'étude de l'effet d'un rajeunissement des sols par des cendres déposées avant 1982, montre une forte élévation du pH, et du taux de saturation en bases échangeables.

Ces observations, appuyées par l'analyse de la composition chimique des cendres de 1982, permettent d'affirmer qu'un apport renouvelé de cendres volcaniques du volcan El Chichón a eu un effet positif sur la fertilité des sols de la région, surtout des sols ferrallitiques acides.

MOTS-CLÉS : El Chichón — Eruption de 1982 — Sols bruns andiques — Sols ferrallitiques — Minéralogie — Effet fertilisant de cendres volcaniques.

ABSTRACT

EFFECTS OF EL CHICHÓN VOLCANIC ERUPTIONS (MEXICO) ON THE CHEMISTRY AND MINERALOGY OF THE SURROUNDING SOILS

This paper deals with the chemistry and mineralogy of a brown andic soil and of three ferrallitic soils in the El Chichón volcanic zone. It emphasizes the effects on the soil properties of several volcanic eruptions, some of them having occurred a long time ago (600, 1250 and 1700 B.P.) and the others having occurred recently (between March 28th and April 4th, 1982).

The brown soils of the surrounding Sierra which derived from rhyodacitic pyroclastic materials overlying the tertiary marls are related to tropical eutropic brown soils, but they also display andic features. In the clay fraction, hallowaysite prevails along with a little allopmane. The surface soil has been slightly acidified by sulphate-rich ashes recently deposited by El Chichón over a few decimeters.

The ferrallitic soils derived from plio-quaternary sediments prevail in the coastal plain north of the volcan. They are composed mainly of kaolinite and goethite along with a little gibbsite. The study of a soil rejuvenation

by ashes deposited before 1982 shows a strong increase in pH and in the exchangeable base saturation percentage.

These observations along with the analysis of the chemical composition of the 1982 ashes allow to assert that new deposits of El Chichón volcanic ashes had a positive effect on the soil fertility in the region and mainly on acid ferrallitic soils.

KEY WORDS : El Chichón — 1982 eruption — Brown andic soils — Ferrallitic soils — Mineralogy — Fertilizing effect of volcanic ashes.

RESUMEN

LOS EFECTOS DE LAS ERUPCIONES DEL VOLCÁN EL CHICHÓN (MÉXICO) SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS DE SUELOS SITUADOS EN SUS CERCANÍAS

Se presenta un análisis de las características químicas y mineralógicas de un suelo pardo-ándico y de tres suelos ferralíticos en el área del volcán El Chichón. Ese artículo pone de relieve los efectos sobre dichos suelos de varias erupciones volcánicas, unas antiguas (600, 1250 y 1700 B.P.) y las otras muy recientes (entre el 28 de Marzo y el 4 de Abril de 1982).

Los suelos pardos de la Sierra en las cercanías del volcán, derivados de proyecciones piroclásticas riodacíticas que cubrieron las margas del terciario, se asemejan a los suelos pardos eutróficos tropicales, pero siguen presentando características ándicas. En la fracción arcillosa, predominan la halosita y un poco de alófana. El horizonte superficial ha sido ligeramente acidificado por una capa de varios decímetros de cenizas ricas en sulfatos arrojadas por El Chichón.

Los suelos ferralíticos derivados del substrato sedimentario plio-cuaternario predominan en la llanura costera más al norte. Son suelos con caolinita y goetita que contienen también un poco de gibsita. El estudio de un rejuvenecimiento de los suelos por parte de cenizas depositadas antes de 1982 indica una fuerte elevación del pH y del porcentaje de saturación en bases intercambiables.

Estas observaciones apoyadas por el análisis de la composición química de las cenizas de 1982 permiten afirmar que repetidos depósitos de cenizas arrojadas por el volcán El Chichón tuvieron un efecto positivo sobre la fertilidad de los suelos de la región y sobre todo en los suelos ferralíticos ácidos.

PALABRAS CLAVES : El Chichón — Erupción de 1982 — Suelos pardos ándicos — Suelos ferralíticos — Mineralogía — Efecto fertilizante de cenizas volcánicas.

INTRODUCTION

A la suite de l'éruption du volcan El Chichón (28 mars au 4 avril 1982), le directeur de l'Institut Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bioticos (l'INIREB), Dr. A. GOMEZ-POMPA, nous avait demandé d'expertiser les effets de cette éruption pyroclastique sur les sols environnants et sur leur utilisation agricole. L'enquête préliminaire, que nous avons effectuée en mai 1982, (GEISSERT *et al.*, 1982a ; QANTIN, 1982), avait conduit à proposer une étude sur l'impact écologique de cette éruption (GEISSERT *et al.*, 1982b). Dans ce but nous avons fait certaines analyses sur des échantillons de sols prélevés près du volcan. Il a paru intéressant de publier ces résultats, concernant une région encore peu connue.

ENVIRONNEMENT

Géomorphologie, géologie

Le volcan El Chichón est situé au sud-est du Mexique, dans l'Etat de Chiapas, à 17°21'N et 93°14'O (fig.1), dans la partie septentrionale des « Montagnes du Nord de Chiapas », unité orogénique présentant un relief variable qui ne dépasse pas généralement 1500 m d'altitude. C'est un cône vulcano-péléen étrangement isolé au centre d'une Sierra de sédiments calcaires et marneux du Crétacé et du Tertiaire, qu'un fort mouvement tectonique a exhaussés et fracturés depuis la fin du Miocène. Deux fosses parallèles à la Sierra, est-ouest, et remplies de sédiments plio-quaternaires, forment au nord et au sud de la Sierra des plaines mollement ondulées (relief en « meules de foin »).

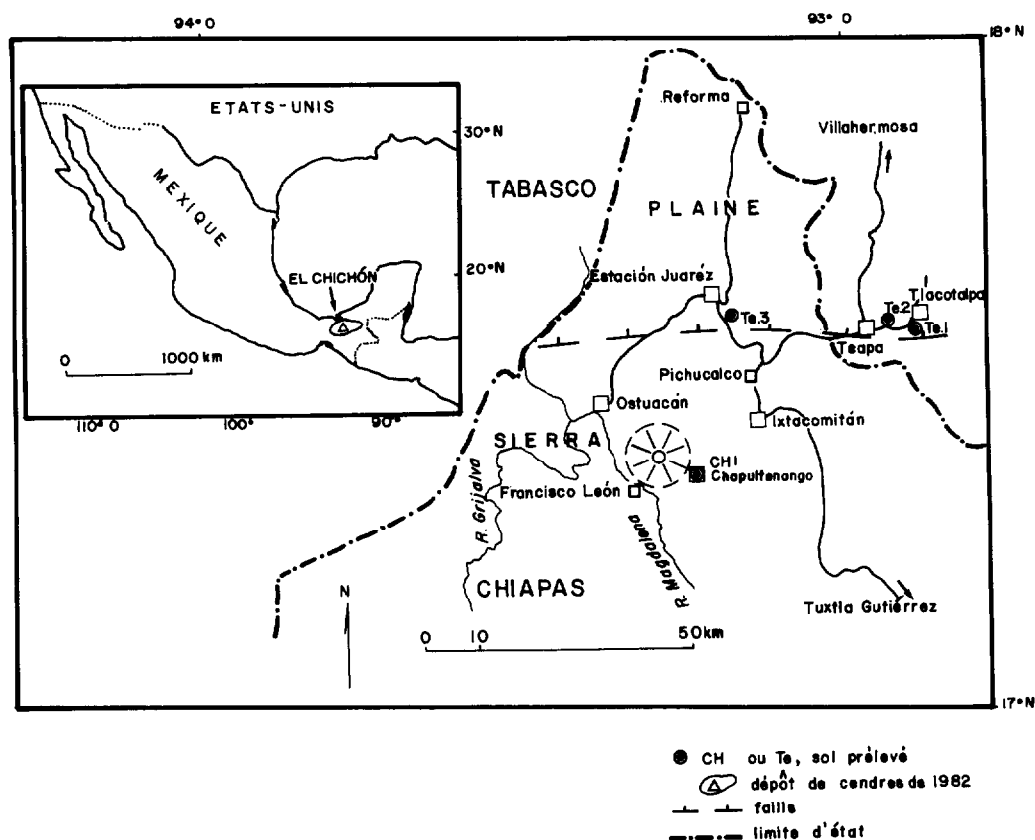


FIG. 1. — Localisation du volcan El Chichón

Climat, végétation

Dans l'ensemble prédomine un climat tropical chaud et humide, sans saison sèche apparente, (CARDOSO D., M.D., 1979). La plaine côtière et le piémont de la Sierra du nord, se caractérisent par des températures moyennes annuelles voisines de 24°C et par une pluviométrie croissante du nord vers le sud, (effet de barrière orographique de la Sierra), qui atteint 4000 mm/an dans le secteur du Chichón (tabl.1a). Plus en altitude, au-dessus de 700 m, le climat devient subtropical (temp.moyenne annuelle voisine de 22°C), mais reste humide toute l'année (tabl.1b).

La végétation naturelle est une forêt tropicale sempervirente (MIRANDA F., 1975) plus ou moins dégradée par les activités agricoles. Autour du volcan prédominent des cultures vivrières et des plantations de caféiers, de cacaoyers et de bananiers ; il y a peu de prairies. Dans les plaines les pâturages sont plus développés et associés à des plantations de canne à sucre.

Volcanisme

L'activité volcanique et tectonique de cette région provient de la subduction de la plaque de Cocos sous les plaques Caraïbienne et Nord-Américaine et de l'intersection par une faille transformante E.O. La formation du volcan El Chichón remonte à plus de 200 000 ans (DUFFIELD *et al.*, 1984). Avant le 28 mars 1982, date du début de l'activité, il comportait un tronc basal, une caldéra et un cône sommital plus récent, dont le sommet atteignait 1260 m d'altitude. Une première éruption phréatomagmatique violente a produit l'explosion du cône sommital et un fort dépôt de cendres (SIGURASSON *et al.*, 1984, cité par MEDINA M.F., 1986). Le 3 avril, après une série de petites éruptions, il s'est produit une nouvelle explosion violente, d'une énergie cinétique quatre fois supérieure à celle du 28 mars. Cette explosion s'est accompagnée de l'effondrement de la colonne éruptive, du dépôt à plus de 15 km du cratère d'épaisses couches de cendres grossières et de ponces, ainsi que de coulées pyroclastiques rayonnantes autour du cône (phase terminale). Le cratère actuel, profond,

TABLEAU Ia

Données climatiques de la station de Pichucalco. Altitude 107 m, située à 20 km au N-E de El Chichón

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Précipitations (mm)	291.0	201.5	169.6	160.7	227.5	377.0	421.4	375.0	591.8	517.2	408.7	295.8	4037.2
Température moyenne (°C)	23.0	23.9	26.2	27.8	28.7	28.5	27.7	28.1	27.8	26.6	24.9	23.2	26.4
Evaporation (mm)	69.7	83.4	119.5	147.2	166.3	149.5	137.3	141.3	120.9	106.4	83.3	71.1	1394.0

TABLEAU Ib

Données climatiques de la station de Chapultenango. Altitude 700 m, située à 10 km à l'est de El Chichón

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Précipitations (mm)	224.5	177.3	260.0	182.1	273.9	437.1	410.0	365.2	544.3	488.5	359.2	344.1	4066.2
Température moyenne (°C)	18.4	20.2	21.0	22.9	23.7	23.9	22.8	23.3	23.3	22.0	20.7	19.1	21.8
Evaporation (mm)	43.2	53.1	78.1	91.0	101.3	90.3	85.5	86.0	73.4	67.9	54.1	44.3	866.0

et dont le rebord ne dépasse pas 1050 m, fut le résultat des dernières explosions du 3 et du 4 avril (MEDINA M.F., 1986). Au-delà de 15 km et à plus de 30 km, les sols ont été recouverts d'un manteau de plusieurs centimètres de cendres fines. Jusqu'à 8-10 km du cratère, la végétation, 15 villages et de nombreuses fermes isolées ont été totalement détruits. Il y eût plus de 180 morts et plusieurs centaines de disparus.

Avant l'éruption, le volcan paraissait endormi ; il était couvert d'une forêt dense et de cultures, même sur le cône sommital ; il n'y avait aucun souvenir d'éruption « historique ». Cependant, la présence de lapilli volcaniques encore peu altérés dans la partie supérieure des sols nous a suggéré qu'une précédente éruption semblable avait eu lieu il y a moins de 2000 ans (QUANTIN, 1982). Cette hypothèse a été confirmée par diverses datations : 1250 ans BP sur un charbon de bois dans une coulée pyroclastique en-dessous du sol ponceux récent (DUFFIELD *et al.*, 1984) ; 600 ans B.P. dans la couche poncée du sol récent (TILLING et RUBIN, 1984, cité par SIMON, 1984).

Cela explique que les sols proches du volcan, formés sur un substrat sédimentaire, ont été fortement rajeunis, à diverses reprises, par des apports de cendres volcaniques.

Pétrologie

a — *Roches volcaniques* : les projections pyroclastiques récentes répandues à la surface du volcan et alentour, comprennent des fragments de laves andésitiques qui proviennent de l'explosion du dôme sommital, et des lapilli ponceux ou des cendres, de même composition, qui ont été émis ensuite par les éruptions péleennes.

La composition minéralogique est assez homogène. Nous avons analysé au microscope optique et par diffraction de rayons X plusieurs échantillons, dont deux de lave, l'un clair et porphyrique (CH.2), l'autre plus sombre et microlitique (CH.3), et un de lapilli ponceux (CH.1). La composition est très proche de celle décrite par COCHEMÉ (1982), à savoir :

- Feldspath plagioclase zoné, labrador-andésine = 26 %.
- Hornblende basaltique brune = 12 %. Augite sombre et augite verdâtre = 2,5 %. Biotite = 1,5 %. Titano-magnétite = 1 %. Apatite en inclusions < 1 %. Gypse, anhydrite < 1 %. Calcite très fine < 1 %.

La mésostase vitreuse représente 40 à 60 % du matériau. Elle est plus abondante dans les lapilli ponceux, de texture fluidale, où elle forme des bulles très étirées. Elle peut inclure quelques microlites de quartz et de cristobalite, décelés seulement par diffraction de rayons X.

La présence en traces du gypse a été signalée par tous les pétrographes qui ont analysé ces produits, (voir notamment KRAWCZYK *et al.*, 1983). Elle provient probablement, comme la calcite, des marnes traversées par le magma. Mais, une partie de la calcite s'est formée in situ par altération des plagioclases et il se pourrait qu'il en soit de même du gypse, sous l'action de gaz riches en CO₂ et SO₂ lors de l'éruption. On a observé que les particules très fines de verres transportés par le vent dans l'atmosphère, jusque sur les neiges du Groënland, étaient recouvertes de fines gouttelettes d'acide sulfurique (FEHRENBACH, 1984).

La présence de laves basaltiques est accidentelle dans les produits récents. Elle a été signalée par KRAWCZYK *et al.* (1983). Ce sont des fragments de lave arrachée aux formations antérieures du volcan. Par contre des blocs de lave, probablement des bombes, à aspect de phonolite, sont répandus en abondance dans les sols formés sur les plaines sédimentaires, au nord-ouest du Chichón. Nous en avons analysé un échantillon prélevé près de Estación Juárez (CH.4). C'est une lave massive, à composition de labradorite : Plagioclase zoné, de type labrador, et augite abondants ; pâte sombre microlitique riche en plagioclases, augite et spinelles, et peu de verres.

Les coulées et projections pyroclastiques antérieures à la dernière éruption de 1982, peuvent comporter des émissions ponçueuses plus siliceuses de type dacite, trachyte et rhyo-dacite quartzifère (CANUL et ROCHA, 1981). Nous avons effectivement observé la présence importante de quartz et de feldspaths alcalins dans la couche de lapilli ponçueux de l'éruption précédente (échantillon CH.11).

b — *Roches sédimentaires* : Dans la Sierra, les roches affleurant près du volcan sont essentiellement des marnes, plus rarement des calcaires.

Dans la plaine, au nord du volcan, il semble que sur les sédiments marneux tertiaires se soient déposés des sédiments lacustres plus récents et des projections volcaniques pyroclastiques. A l'ouest de Pichucalco, près de Estación Juárez et de Oxuacán, nous avons observé à la base des sols une formation de tuf, qui est probablement volcano-sédimentaire. Il est composé (échantillon CH.5) de micas (biotite, muscovite) et de feldspaths plagioclases abondants, d'un peu de pyroxène (hypersthène), de quartz et de traces d'épidote et de magnétite. Il est cimenté par une matrice argileuse (chlorites et smectites), qui comporte un peu de calcite et de dolomite. Les sols incorporent des blocs de labradorite et l'on observe même, au sud de Estación Juárez, une à plusieurs couches de cendres volcaniques altérées, près de la surface.

Composition chimique des produits de l'éruption volcanique de 1982 (Tabl.1)

Nous avons analysé un échantillon (CH.10) de lapilli ponçueux, prélevé à Chapultenango. Le résultat est très proche de ceux obtenus par HOFFER *et al.* (1982) et par FRAWCZYK *et al.* (1983) sur des lapilli ponçueux et sur des laves andésitiques. Il s'agit de trachy-andésites. Ce sont des roches alcalines, riches en sodium et en potassium ; elles appartiennent à la série « shoshonitique » des laves calco-alcalines enrichies en potassium, qui se forment dans le domaine des marges continentales (GIROD, 1978 — KRAWCZYK *et al.*, 1983). En outre, ces roches sont riches en phosphore et en soufre. Une analyse antérieure de cendres fines (SARH, 1982) avait fourni des résultats bien différents, (tabl.II, réf. 4), notamment pour SiO₂, Al₂O₃, MgO, K₂O et P₂O₅. Cela est étonnant, mais il est possible que les cendres aient une composition bien différente des lapilli proches du volcan. Ceci est confirmé par l'analyse de la mésostase vitreuse (COCHEMÉ *et al.*, 1982) et l'analyse de microponces à différentes distances du cratère et de micro-particules de verres déposées sur les neiges du Groënland (FEHRENBACH, 1984), dont la composition, beaucoup plus siliceuse et alcaline que celle des trachy-andésites, s'apparente à des rhyodacites. JUVIGNE (1983) montre aussi qu'il y a eu un tri des minéraux et des verres volcaniques suivant l'éloignement du volcan.

LES SOLS

Présentation générale

La distribution des sols, avant l'éruption de 1982, était la suivante : — andosols sur les flancs du volcan — sols bruns eutrophes sur les marnes de la Sierra, (rajeunis par des cendres volcaniques, à caractères andiques à proximité du volcan) — rendzines et sols bruns calcaires sur les calcaires de la Sierra — sols ferrallitiques, argileux, plus ou moins désaturés, sur les sédiments tertiaires de la plaine au Nord du volcan. Avant l'analyse au laboratoire, nous avons supposé que les sols rouges argileux des plaines avaient les propriétés de sols ferrallitiques (QUANTIN, 1982).

Tous les sols ont reçu des apports volcaniques lors des éruptions de 1982. Sur le volcan lui-même, les andosols ont été enfouis sous d'épaisses strates de projections grossières ou de coulées pyroclastiques. Sur la Sierra, les sols bruns-andiques ont été recouverts d'une manteau décimétrique de lapilli ponçueux et de cendres ou de coulées pyroclastiques plus épaisses. Dans la plaine, les sols ferrallitiques n'ont reçu qu'une couche centimétrique de cendres fines, qui ont été soit incorporées à la partie supérieure du sol, soit enlevées par le ruissellement superficiel.

TABLEAU II
Composition chimique des projections du Chichón en 1982

Références	1			2		3	4	5
	a	b	c	a	b			
SiO ₂	59.3	56.4	58.2	56.61	55.75	56.55	66.48	69.17
Al ₂ O ₃	17.3	17.3	16.8	18.09	18.05	16.84	12.96	17.13
Fe ₂ O ₃	} 5.4	} 6.3	} 6.5	3.00	3.71	} 7.62	2.16	} 1.89
FeO				3.11	2.49		1.28	
TiO ₂	0.7	0.8	0.8	0.65	0.66	0.70	nd	0.38
MnO	0.1	0.1	0.2	0.18	0.18	0.22	0.17	nd
MgO	1.8	2.2	2.1	2.21	2.42	2.65	1.64	0.38
CaO	6.2	6.9	7.5	7.78	7.16	7.61	4.13	1.80
Na ₂ O	4.5	4.2	4.2	4.21	4.24	4.41	4.33	4.48
K ₂ O	3.1	2.9	2.4	2.70	2.63	2.38	3.62	4.75
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.1	0.34	0.33	0.34	0.69	-
CO ₂	-	-	-	0.09	0.38	-	-	-
SO ₃	-	-	-	-	-	-	1.80	-
H ₂ O+	} 1.4	} 1.3	-	} 1.02	} 1.24	0.49	} 0.55	-
H ₂ O-						0.16		
traces							0.16	
total	99.9	98.6	98.8	99.99	99.24	99.98	99.97	99.98

Réf.1 — HOFFER *et al.* 1982 : a. éruptions 28 mars-2 avril, $\bar{m}$ 12 échantillons ; b. éruptions 3 au 7 avril, $\bar{m}$ 22 échantillons ; c. andésite du dôme, 1 échantillon.

Réf.2 — KRAWCZYK *et al.* 1983 : a. cendres ponceuses, $\bar{m}$ 9 échantillons ; b. andésite, $\bar{m}$ 4 échantillons.

Réf.3 — Laboratoire ORSTOM Bondy, 1983, échantillon CH.10, Lapilli ponceux.

Réf.4 — SARH, Tuxtla-Gutierrez, Chiapas, Mexique, mai 1982 ; $\bar{m}$ 4 échantillons de cendres fines.

Réf.5 — Fehrenbach, 1982 : particules de verre du Chichón, prélevées au Groënland, $\bar{m}$ 6 particules.

Dans cette étude, nous n'avons analysé qu'un sol brun-andique et trois sols ferrallitiques (d'après la classification de C.P.C.S., 1967).

Les sols bruns eutrophes-andiques

a. Description du profil de Chapultenango, CH.1

Matériau originel : marnes calcaires enfouies sous des lapilli trachy-andésitiques et trachytiques d'une précédente éruption eux-mêmes recouverts par 5 cm de cendres trachy-andésitiques de l'éruption de 1982.

Position : partie inférieure d'un versant à pente de 30 à 50 %, sur une colline à fort relief, à 10 km est du cratère.

Végétation : prairie de graminées à enracinement profond, de grande taille, en touffes.

Description abrégée :

5 - 0 cm — cendres et lapilli trachy-andésitiques fraîchement déposés, de couleur grise (7.5YR5/0 frais, 2.5Y 6.5/0 sec).

0 - 25 cm — A₁₁ ; brun-très foncé (10YR3/2 humide, à 4/3 sec) : texture argilo-sableuse et humifère ; structure grumeleuse fine, meuble, très poreuse ; très humide et un peu collant ; enracinement très dense, racines fines ; bonne activité biologique ; test de Na F + (faible et lent).

25 à 50-60 cm — (B)₁ ; brun foncé (7.5YR3/2, humide, 10YR5/3, sec) ; texture progressivement plus sableuse et moins humifère ; structure plus large, polyédrique sub-anguleuse, moyenne, plus consistante et plus plastique ; bonne porosité ; enracinement moins dense, mais encore important ; bonne activité biologique ; sol humide, mais bien drainé ; test de Na F + (lent).

> 60 cm — C ; brun-foncé ; texture plus sableuse ; passage graduel à des marnes altérées, à structure schisteuse, vers 1 m de profondeur.

Ce sol a des caractères andiques discrets, marqués par une faible réaction au test de FIELDS et PERROTT (1) explicable par l'incorporation au sol dérivé de marnes des produits d'altération de cendres volcaniques de la précédente éruption du volcan Chichón.

Prélèvements :

CH.10 Cendres trachytiques, sur le plateau de Chapultenango

CH.11 Horizon A₁₁, 0-15 cm

CH.12 Horizon (B)₁, 30-50 cm.

b. Minéralogie (tabl.III)

Les résultats ont été obtenus par diffraction de rayons X sur poudre de sol total et sur la fraction < 2 μ m orientée (normale, glycolée, chauffée à 100 et à 490° C), provenant des horizons A₁₁ et (B)₁.

Le sol contient de 70 à 80 % de minéraux primaires résiduels et de 30 à seulement 20 % de minéraux argileux, dont la composition est détaillée dans le tableau III.

TABLEAU III
Composition minéralogique des cendres et du sol

	Cendres CH.1.0.	Horizon A ₁₁ CH.1.1.	Horizon (B) ₁ CH.1.2.
<i>Minéraux primaires</i>			
Quartz (et cristobalite)	t	+++	++
Feldspaths	+++	+	++
Hornblende	+	+	+
Micas	t	t	t
Magnétite	t	t	t
Apatite	t	e	t
<i>Minéraux secondaires</i>			
Halloysite-métahalloysite		+	+
Illite		e	e
Chlorite, smectite-alumineuse		+	+
Allophane		t	+
Gibbsite		t	t
Gœthite		e	t
Calcite	t		
Anhydrite	t		
+++ abondant	++ moyen	+ un peu	t traces
			e traces infimes

La présence de quartz, abondants dans le sol, suggère que ceux-ci proviennent de cendres volcaniques, plus siliceuses (rhyo-dacitiques de CANUL et ROCHA, 1981), que les projections de 1982. Il semble que les feldspaths soient également plus alcalins (sanidine et oligoclase-andésine, au lieu de andésine). La quantité de feldspaths augmente, relativement au quartz, de l'horizon A₁₁ vers l'horizon (B)₁, où le matériau volcanique ponceux est plus grossier et moins altéré.

Les argiles sont composées d'un mélange d'halloysite, partiellement déshydratée en métahalloysite, et d'ar-

giles 2 : 1 de type interstratifié irrégulier de smectites hydroxy-alumineuses et de chlorites. Celles-ci proviennent peut-être de la transformation des micas. La présence d'allophane, peu évidente dans l'horizon A₁₁, s'affirme dans l'horizon (B)₁, où les minéraux argileux sont moins abondants. Il y a des traces de gibbsite et de gœthite mal cristallisée.

Ces résultats montrent que le sol est formé en grande partie de produits volcaniques émis récemment par le Chichón. Il en contient beaucoup de minéraux résiduels. C'est un sol jeune, qui se caractérise par des argiles imparfaites, dont l'halloysite et l'allophane.

(1) Test FIELDS et PERROTT : réaction alcaline d'échange avec Na F normal en présence d'allophane, provoquant le virage au rouge de la phénol-phtaléine.

c. Caractères physiques et chimiques (tabl.IV)

TABLEAU IV
Propriétés physiques et chimiques du sol total

SOL	CH.1	CH.1
Echantillon	CH.11	CH.12
Profondeur (cm)	0-15	30-50
Horizon	A 11	(B)
TEXTURE (%)		
Argile	30.8	23.9
Limon fin	16.1	12.9
Limon grossier	6.5	6.0
Sable fin	16.2	17.8
Sable grossier	23.3	34.4
H ₂ O à 105°C	3.1	2.4
MATIÈRE ORGANIQUE		
Totale (%)	7.1	4.9
Carbone (‰)	40.9	28.4
Azote (‰)	4.6	3.3
C/N	8.8	8.6
pH (SOL/EAU = 1/2.5)		
pH eau	4.5	5.3
pH KCl	4.0	4.3
pH NaF	9.4	10.0
COMPLEXE ABSORBANT (mé/100g)‰		
Ca	6.4	7.0
Mg	0.9	1.9
K	0.3	0.4
Na	0.2	0.2
S	7.8	9.5
T	17.3	14.8
V = S/T (%)	46.0	64.0
RAPPORTS SOL-EAU		
Humidité en place	54.6	57.4
pF 4.2	26.0	27.0
pF 3.0	44.8	39.1
PHOSPHORE		
P ₂ O ₅ total (‰)	2.8	2.7

Le sol brun de Chapultenango a les caractères suivants :

- une texture sablo-argileuse et une teneur élevée en matière organique (7 à 5 %) ;
- un rapport C/N < 9, qui montre une bonne minéralisation de l'humus ;
- une capacité de rétention en eau élevée (45 à 40 %), relativement à son taux d'argile ;
- un pH franchement acide dans l'horizon A₁₁ (4,5), s'élevant en profondeur. Peut-être est-ce dû aux apports de cendres riches en H₂SO₄, en surface ? ;
- un pH-NaF élevé, de 10 en (B)₁, qui indique la présence notable d'allophane ;
- un taux de saturation en cations élevé, surtout en calcium, dans l'horizon (B)₁, et encore proche de 50 %

en A₁₁, qui caractérise un sol jeune ; un taux de potassium échangeable important ;

- un taux de phosphore moyennement élevé (2,8 ‰).

Ce sol a donc des caractères de sol brun eutrophe, de bonne fertilité, et aussi, mais modérément, de sol andique à allophane.

d. Géochimie (tabl. V)

L'analyse « triacide » fait apparaître la composition des produits d'altération, solubles dans les acides, et celle des minéraux résiduels, insolubles. Il en ressort les résultats suivants :

- l'abondance des minéraux résiduels insolubles, (55 % dans l'horizon A₁₁ et 72 % dans l'horizon (B)₁) ;

- l'abondance relative de la silice insoluble, correspondant approximativement à 25-30 % de quartz, respectivement en A₁₁ et (B)₁ ;

- l'enrichissement relatif en oxydes d'Al, Fe et Ti, des produits d'altération ; plus marqué en A₁₁ (rapport SiO₂/Al₂O₃ mol. = 2.1) qu'en (B)₁ (même rapport = 2.4).

Ces résultats sont cohérents avec l'analyse minéralogique. Ils montrent une altération plus avancée des cendres volcaniques dans l'horizon A₁₁, en des produits argileux qui se rapprochent de ceux des sols ferrallitiques à kaolinite et hydroxydes de fer. La composition de l'horizon (B)₁, correspond mieux à celle d'un sol brun, c'est-à-dire d'un sol jeune (Inceptisol).

Les sols ferrallitiques

Une séquence de trois profils, d'est en ouest, dans la plaine de Teapa-Pichucalco, met en évidence l'influence croissante des apports volcaniques dans le rajeunissement de sols argileux ferrallitiques.

a. DESCRIPTION DE PROFILS

a.1. — Sol ferrallitique, fortement désaturé, de Téapa-Est, Te.1

Localisation : route de Téapa à Tlacotalpa, km 10.

Matériau originel : sédiment marneux + alluvions et peut-être des projections volcaniques — présence de galets marneux et de silex ou quartzites arrondis.

Position : plateau = ancienne plaine surélevée, avec petites buttes mamelonnées, peu élevées, très arrondies ; drainage presque nul ; petits marais temporaires.

Végétation : prairie ; plantes hydrophiles et acidophiles de type Carex et Phragmites.

Description abrégée :

- 0 — 40 cm — A₁₁, A₁₂ et A₃ ; passage progressif de l'horizon humifère à l'horizon B ; brun-rouge foncé ; très argileux et humifère ; structure grenue (polyédrique arrondie) moyenne et grossière ; cohésion assez forte ; perméabilité médiocre ; enracinement dense.
- 40 — 200 cm — B ; brun-rouge (5YR/5.5/4 sec) ; très argileux, avec quelques graviers de marnes et

TABLEAU V
Composition chimique du sol total (résultats en % sol sec 105°C)

Sol Echantillon Profondeur (cm) Horizon	CH 1 CH 11 O-15 A 11			CH 1 CH 12 30-50 B 1		
	TRIACIDE	RESIDU	GLOBAL	TRIACIDE	RESIDU	GLOBAL
Fraction analysée (< 2mm)						
Perte au feu totale (1000 °C)	12.00		12.00	5.85		5.85
...dont : H ₂ O						
...dont : CO ₂						
Résidu total :	55.50			71.95		
...dont volatil FH (Si O ₂)						
...dont non volatil FH						
SiO ₂ "Siliates" "Totale"	11.85	43.52	55.42	7.90	57.27	65.17
Al ₂ O ₃	9.60	6.23	15.83	5.50	7.21	12.71
Fe total en Fe ₂ O ₃	6.60	0.66	7.26	5.40	1.22	6.32
Fe ₂ O ₃ réel						
Fe O						
Ti O ₂	0.72	0.04	0.76	0.48	0.10	0.58
Mn O ₂ : N ou Mn O : P	0.213	0.043	0.253	0.131	0.070	0.204
Ca O	1.66	2.49	4.15	1.45	2.76	4.21
Mg O	1.43	0.55	1.98	0.91	0.84	1.65
K ₂ O	0.31	0.50	0.81	0.30	0.92	1.22
Na ₂ O	0.50	1.42	1.92	0.64	1.56	2.20
P ₂ O ₅ total	0.28		0.28	0.27		0.27
TOTAL	100.36	55.50	100.36	100.38	71.95	100.38
Si O ₂ / R ₂ O ₃	1.45		1.52			
Si O ₂ / Al ₂ O ₃	2.09	1.43	2.43		1.35	3.72
H ₂ O ⁻	3.1		3.1	2.4		2.4

de grès altérés et rubéfiés, et de quartzites ; structure polyédrique moyenne et grossière ; cohésion assez forte, plastique ; faces des agrégats un peu luisantes mais sans cutanes d'illuviation apparente ; sans signe évident d'hydromorphie ; peu de racines.

2 à > 5 m — (B)/C C ; brun ; passage progressif au matériau sédimentaire marneux, très altéré et très argilifié.

Prélèvement : Te-1.1, horizon B, rouge, 150-200 cm.

a.2 — Sol ferrallitique moyennement désaturé de Téapa, faiblement rajeuni par des cendres volcaniques ; Te-2

Localisation : route Téapa-Tlacotalpa, km³.

Matériau originel : sédiment lagunaire marneux, et projections volcaniques peu apparentes (un éclat de labradorite) en surface.

Position : entre plateau et plaine actuelle, relief plutôt érodé, vallonné de collines arrondies (en karst mame-lonné) ; à proximité d'un axe de drainage, situé le long de la falaise calcaire tectonique.

Végétation : prairie acidophile à Carex et Lycopodes.

Description abrégée :

0 - 30 - 40 cm — A₁₁, A₁₂ ; brun-foncé ; argileux et humi-fère : structure nuciforme (polyédrique à

angles émoussés) grossière ; perméable et bien drainé ; enracinement dense.

40 à > 150 cm — B ; brun-rouge (5YR6/4 sec) ; argileux ; structure polyédrique grossière ou prismatique fine, à fines fentes de retrait (présence d'argiles gonflantes probables), à caractère vertique peu marqué ; peu de racines).

1.5 à 10 m — C ; brun ; schisteux ; sédiment marneux très altéré et argilifié, friable.

Prélèvement : Te-2.1, horizon B, vers 1m. de profondeur.

a.3 — Sol ferrallitique faiblement désaturé, de Téapa-Ouest, fortement rajeuni par des cendres volcaniques, Te-3

Localisation : Route Pichucalco à Estación Juarez, km 14, près de Est-Juarez.

Matériau originel : sédiment lagunaire qui rappelle un tuf fin, stratifié à ciment calcaire, surmonté de nombreux blocs et cailloux de lave volcanique, et d'un recouvrement probable de cendres volcaniques.

Relief : plateau de karst « mame-lonné », collines arrondies, profil sur le pied d'un mamelon.

Végétation : prairie.

Description abrégée :

0 - 20 cm — A₁₁ ; horizon brun foncé humifère formé à partir de cendres volcaniques (venant du Chichón), déposées lors d'éruptions antérieures (~ quelques milliers d'années ?).

20-40 cm — II A₁ : Horizon brun-rouge foncé, argile humifère, du sol antérieur, semblable à ceux observés près de Teapa-Est.

40 cm à > 2 m — II B ; Horizon brun-rouge (7.5YR6/6 sec), très argileux incluant des cailloux et bombes volcaniques décimétriques, certaines de type labradorite, peu altérées, sauf une écaille superficielle, d'autres de type andésite scoriacée, presque totalement altérées.

Prélèvement : Te-3.1., horizon B, 120-150 cm.

b. Minéralogie (tabl.VI)

TABLEAU VI
Composition minéralogique du sol total

	Te.1.1.	Te.2.1.	Te.3.1.
<i>Minéraux primaires</i>			
Quartz	+	t	t
Feldspath	e	e	t
Pyroxène		e	t
<i>Minéraux secondaires</i>			
Kaolinite-Métahalloysite	+++	++++	++++
Chlorite-smectite alumineuse	t	t	t
goëthite (et hématite)	++	++	++
gibbsite	t	t	t
allophane	e	e	t
++++ très abondant	+++ abondant	++ moyen	+ un peu
		t traces	e traces infimes

La composition minéralogique varie peu, qualitativement et quantitativement dans les trois sols.

La fraction minérale résiduelle, peu abondante, est surtout constituée de quartz, produit peu altérable. Celui-ci représente 12 % dans le sol le moins rajeuni (Te.1.1.) par des cendres volcaniques, à l'est du Chichón. Il n'y en a plus que des traces (< 3 % et < 2 %, en Te 2.1 et Te 3.1) dans les sols situés au nord et au nord-ouest du Chichón. En revanche, l'influence des apports volcaniques se marque par des traces croissantes de feldspaths et de pyroxènes.

La fraction minérale secondaire prédomine largement. Il s'agit surtout d'une argile 1 : 1 apparentée à la kaolinite, dont la quantité est proche de 60 % en Te-1.1. et de 70 % en Te-2.1. et Te-3.1. Dans les deux premiers sols, peu modifiés par des apports volcaniques, il s'agit d'une kaolinite désordonnée, dont le diagramme de diffraction X est intermédiaire vers celui de la métahalloysite. Dans le paléosol enrichi par des apports volcaniques (Te.3), le diagramme s'apparente nettement à celui d'une métahalloysite (à 7.34A), à laquelle s'ajoute probablement des traces d'allophane. Il y a dans les trois sols une quantité importante de goëthite, et probablement un peu d'hématite en Te.1.1. et Te.2.1. (15 à 16 %). La goëthite est moins bien cristallisée dans le

paléosol rajeuni par des apports volcaniques. On note aussi la présence, en traces, d'argiles 2 : 1 mal cristallisées, de type pseudo-chlorite et smectite hydroxy-alumineuse. Enfin il y a toujours des traces de gibbsite ; mais ce minéral s'affirme et augmente, de 2 % en Te.1.1., à 4 % en Te.3.1., sous l'effet probable des apports de cendres volcaniques. Cela paraît contradictoire avec le rajeunissement du sol. Mais il est possible que l'altération rapide des cendres, matériel très poreux, favorise cette formation.

c. Caractère chimiques (Tabl.VII)

Les échantillons analysés sont très argileux (plus de 80 %) et peu humifères (0,5 à 1 % de M.O.). Le rapport C/N voisin de 10 indique une bonne minéralisation de l'humus.

La capacité d'échange cationique varie de 7 à 10 me/100 g ; calculée en fonction du taux d'argile minéralogique, elle est de 10 à 14 me/100 g d'argile. Cette valeur est compatible avec celles de kaolinites désordonnées (plutôt que de métahalloysites). Elle augmente légèrement dans les sols rajeunis par des apports volcaniques (Te.21 et Te.31).

Le caractère le plus remarquable est l'élévation très sensible et progressive du pH (de 4.7 à 6.2) et du taux

de saturation en bases (de 8 à 71 %), en fonction du rajeunissement par des apports volcaniques à la surface des sols (de Te.1 à Te.3). Il y a également un accroissement en phosphore (P_2O_5 total de 1 à 1.5 ‰).

TABLEAU VII
Propriétés chimiques du sol total

SOL	TE.1	TE.2	TE.3
Echantillon	1	1	1
Profondeur	150-200	100-120	120-150
Horizon	B	B	B
H ₂ O à 105°C	3.0	3.5	4.1
pH (SOL/EAU = 1/2.5)			
H ₂ O	4.7	5.5	6.2
KCl	4.1	4.0	4.9
NaF	9.0	9.1	9.2
MATIÈRE ORGANIQUE			
Totale (‰)	5.3	11.1	5.9
C (‰)	3.0	6.5	3.4
N (‰)	0.4	0.6	0.3
C/N	7.7	11.2	10.3
COMPLEXE ABSORBANT (mé/100 g)			
Ca	0.25	1.26	4.35
Mg	0.16	0.67	2.37
K	0.03	0.03	0.16
Na	0.06	0.17	0.26
S	0.50	2.13	7.14
T	6.60	9.90	10.10
V = S/T (%)	8.00	22.00	71.00
P ₂ O ₅ (‰) total	1.13	0.95	1.50

d. Géochimie (tabl. VIII)

L'analyse « triacide » nous a permis d'évaluer la quantité de minéraux insolubles, essentiellement du quartz.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 mol. voisin de 1.8 fait apparaître une petite quantité d'alumine non silicatée, correspondant à de la gibbsite ; ce qui a permis de la calculer et de vérifier qu'elle est légèrement plus abondante dans les sols rajeunis par des cendres volcaniques. Le taux d'oxyde de fer (environ 15 % de Fe_2O_3) est constant ; il correspond probablement à de la goëthite.

Il apparaît ainsi une bonne correspondance entre les résultats d'analyses chimiques et minéralogiques. La composition chimique de ces trois sols correspond à celle de sols ferrallitiques à kaolinite et à goëthite, ne contenant que des traces d'hydroxyde d'alumine (gibbsite). Globalement, à l'exception du quartz résiduel, le produit d'altération est quasiment constant. Cependant l'effet des apports volcaniques, croissant d'est en ouest se manifeste de trois manières : une moins bonne cristallinité de la kaolinite et de la goëthite, une formation

plus nette de la gibbsite, et un très fort accroissement du taux de cations échangeables.

CONCLUSIONS

L'étude des sols de la région du volcan El Chichón, notamment des sols bruns sur marnes de la Sierra et des sols ferrallitiques de la plaine au nord du volcan, a montré une influence des projections pyroclastiques, antérieurement et lors de l'éruption de 1982.

Sur la Sierra, près du volcan, les sols bruns formés au-dessus des marnes tertiaires, dérivent pour une grande part de projections pyroclastiques récentes (600, 1250 et 1700 ans B.P., d'après SIMON, 1984). Ces matériaux étaient plus siliceux, de type rhyo-dacite, que ceux de l'éruption de 1982 (trachy-andésite). Les sols qui en dérivent sont apparentés à des sols bruns eutrophes tropicaux ; mais ils ont aussi des caractères andiques, dus à leur origine volcanique. Leur fraction argileuse comporte en prédominance de l'hallowite et un peu d'allophe, qui proviennent de l'altération des cendres volcaniques, mais aussi un peu de smectite hydroxy-alumineuse et de chlorite, qui proviennent probablement des marnes sous-jacentes. Le sol superficiel a été acidifié légèrement par la couverture des cendres de 1982, qui sont riches en SO_2 .

Dans la plaine, au nord du volcan, prédominent des sols ferrallitiques, qui dérivent du substrat sédimentaire plio-quaternaire. Mais une part importante de projections volcaniques, croissante d'est en ouest, et provenant sans doute d'El Chichón, s'y est ajoutée, modifiant les propriétés des sols. La composition minéralogique du sol, au-delà de 1 m de profondeur, est assez homogène. Elle est constituée principalement de kaolinite désordonnée (60 à 70 %) et de goëthite (15 à 16 %) ; elle comporte aussi un peu de smectite hydroxy-alumineuse et de gibbsite, ainsi que des minéraux résiduels peu altérables (surtout du quartz). L'influence des apports volcaniques antérieurs à 1982 se manifeste, au nord-ouest d'El Chichón, par : une moindre cristallinité des argiles (méthalloysite plutôt que kaolinite et traces d'allophe) et des oxyhydroxydes de fer ; un faible accroissement de la capacité d'échange cationique, du pH NaF, et du phosphore. L'effet du rajeunissement par des cendres volcaniques superficielles (antérieures à 1982) s'est traduit surtout par une forte élévation du pH (de 4.7 à 6.2) et du taux de saturation en bases échangeables (de 8 à 71 %).

L'effet du recouvrement des sols par les cendres volcaniques projetées par le volcan El Chichón en 1982 peut être évalué d'après leur composition chimique, et aussi d'après leur épaisseur et leur éloignement du cra-

TABLEAU VIII
Composition chimique du sol total (résultats exprimés en % sol sec 105°C)

Sol Echantillon Profondeur (cm) Horizon	TE 1 1 150-200 B			TE 2 1 100-110 B			TE 3 1 120-150 B		
Fraction analysée (< 2mm)	TRIACIDE			RESIDU			TRIACIDE		
Perte au feu totale (1000 °C)	12	6	0				14	4	0
...dont : H ₂ O									
...dont : CO ₂									
Résidu total :	13	2	5*				3	7	5*
...dont volatil FH (Si O ₂)									
...dont non volatil FH									
SiO ₂ "Silicates" "Totale"	29	4	5	12	6	2	33	3	5
Al ₂ O ₃	27	6	5	0	1	9	31	0	0
Fe total en Fe ₂ O ₃	15	0	0	0	0	1	14	6	0
Fe ₂ O ₃ réel Fe O									
Ti O ₂	1	4	5	0	0	2	1	5	3
Mn O ₂ : N ou Mn O : P	0	0	3	4	0	0	0	5	2
Ca O	0	1	7	0	0	6	0	2	3
Mg O	0	2	3	0	0	2	0	2	7
K ₂ O	0	1	7	0	0	9	0	0	8
Na ₂ O	0	1	5	0	2	4	0	1	5
TOTAL	100	20	4	13	2	5	99	4	1
Si O ₂ / R ₂ O ₃	1	3	4				1	4	0
Si O ₂ / Al ₂ O ₃	1	8	0				1	8	2
H ₂ O -	3	0	0				3	5	0

* : le résidu. Celui de Te.2 et Te.3 est constitué essentiellement de SiO₂ sous forme de quartz et de cristobalite, celui de Te.1, de même, est surtout du quartz, et contient aussi des traces d'un feldspath.

rière (leur dimension et leur acidité allant décroissant, et leur altération étant plus rapide). La composition chimique des cendres permet de prévoir un enrichissement plus rapide du sol en éléments majeurs rapidement solubles tels que : Na, K, Ca, Mg, Si, P et S, et en certains éléments mineurs utiles aux plantes tels que Cu et Zn (d'après KRAWCZYK, 1983). Cet enrichissement n'est toutefois prévisible que si les trois conditions suivantes sont remplies. Il importe que l'épaisseur des cendres ne soit pas excessive (< 15 cm), ni qu'il y ait acidification du sol par des produits riches en SO₂ (près du volcan), ni que la dilution de l'azote par l'accroissement des éléments S et P, ne provoque une carence relative en azote. C'est évidemment sur les sols ferrallitiques acides, situés au nord-est du volcan, qu'il faut attendre les effets les plus bénéfiques, du fait de leur pauvreté originelle et aussi de la solubilité et de l'alcalinité plus grande des cendres fines, déposées loin du volcan.

Cela a été confirmé par l'expérimentation du laboratoire de fertilité des sols du Colegio de Postgraduados de Chapingo (Mexico) et par l'observation au champ. CAVALLARO *et al.* (1984) ont montré en effet que l'in-

corporation au sol des cendres fines de l'éruption de 1982 se traduisait par :

- une augmentation de la capacité d'échange effective et une diminution des charges variables et de Al extractible ;
- une augmentation de P assimilable, de Ca et K échangeables ;
- un accroissement de l'assimilation de P, Ca et K, et des rendements ;
- mais une diminution relative de l'assimilation de N, qu'il faut compenser.

Une incorporation de 25 % de cendres fines aux sols acides suffit pour augmenter fortement leur fertilité.

L'effet de l'éruption volcanique d'El Chichón en 1982 est donc globalement positif pour la fertilité des sols de la région, même s'il a été catastrophique sur les flancs du volcan lui-même et de ses abords immédiats. Il est probable que cette amélioration sera durable dans les sols qui ont incorporé plusieurs centimètres de cendres fines, comme le montre la séquence est-ouest des sols ferrallitiques de la plaine, qui avaient reçu des projections de cendres antérieures.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 26 novembre 1987

BIBLIOGRAPHIE

- CANUL (R.F.), et ROCHA (V.S.), 1981. — Informe geológico de la zona, geotermica de « El Chichonal », Chiapas. Rapport non publié du Département Géothermique de la Commission Fédérale d'Electricité, Morelia, Michoacan, México ; septembre 1981.
- CARDOSO D. (M.D.), 1979. — El clima de Chiapas y Tabasco. Inst. de Geogr. UNAM, Mexico, 99 p.
- CAVALLARO (N.), ETCHEVERS (J.D.) et GARCIA (D.L.), 1984. — The nature of the volcanic material from the Chichonal Volcano (Mexico) and its effects on agricultural production. Comunicaciones, Congr. Int. de Suelos Volcanicos, Univ. La Laguna, Tenerife. Isl. Canarias, España : 248-265.
- COACHEME (J.J.) *et al.*, 1982. — L'éruption du volcan Chichonal (mars-avril 1982) dans l'Etat de Chiapas, Mexique. C.R.Ac.Sci. Paris, 295 : 7737-7744.
- C.P.C.S., 1967. — Classification des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des sols ; Labo Géol. Pédol., ENSA Grignon, 87 p. *multigr.*
- DUFFIELD (W.A.), TILLING (R.I.) et CANUL (R.), 1984. — Geology of El Chichón volcano, Chiapas, Mexico. *J. Volcanology Geoth. Res.*, 20 : 117-132.
- FEHRENBACH (L.), 1984. — Microscopie analytique de micro-particules de verre volcanique piégées dans les glaces polaires. Thèse Univ. Paris-Sud, Orsay, 28 sept. 1984, 85 p. *multigr.*
- GEISSERT (D.), GEISSERT (E.) et QUANTIN (P.), 1982a. — Informe preliminar sobre el impacto ecologico de la erupción del volcán Chichonal. Rapport non publié, I.N.I.R.E.B., Dep. Plan. Ecológ. Xalapa de Vera Cruz, mai 1982, 21 p., *multigr.*
- GEISSERT (D.) et GEISSERT (E.), 1982b. — Impacto ecologico de la erupción del volcán Chichonal : Observaciones preliminares sobre su importancia y su evolución. Rapport non publié, INIREB, Dep. Plan. Ecológ., Xalapa de Vera Cruz, Mexique, août 1982, 30 p., *multigr.*
- GIROD (M.) *et al.*, 1978. — Les roches volcaniques. Pétrologie et cadre structural. Doin Ed. Paris, 239 p.
- HOFFER (J.M.), GOMEZ (F.P.) et MUELA (P.), 1982. — Eruption of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico, 28 March to 7 april 1982. *Science*, vol. 218 : 1307-1308.
- JUVIGNE (E.), 1983. — Les variations minéralogiques dans les retombées de 1982, du volcan El Chichón (Chiapas, Mexique) et leur intérêt pour la téphrostratigraphie. *Ann. Soc. Géologique Belgique*, T.106 : 311-325.
- KRAWCZYK (R. Von) *et al.*, 1983. — Der Ausbruch des Vulkans « El Chichón » (Mexiko) im Frühjahr 1982. *Zbl. Geol. Paläont.*, Teil I, 1983, H 3/4 : 234-245.
- MEDINA (M.F.), 1986. — Analisis de las columnas eruptivas del volcán Chichón, Marzo-Abril, 1982. Velocidad de salida, presión de la cámara magmática y energía cinética asociada. *Geofísica Intern.* 25-1 : 233-249.
- MIRANDA (F.), 1975. — La vegetación de Chiapas. Ed. Gob. Estado de Chiapas, Mexico. la. parte, 265 p.
- QUANTIN (P.), 1982. — Mission d'expert auprès de l'INIREB (Xalapa, Mexique) du 16 mai au 3 juin 1982, sur les sols endommagés par l'éruption du volcan Chichón. Compte rendu de la Mission ORSTOM, Bondy, France ; rapport non publié de 17 p. *multigr.* ; 15 juin 1982.
- RAMPINO (M.R.), et SELF (S.), 1984. — The atmospheric effects of El Chichón. *Sci. American*, Vol. 250, n° 1 : 34-43.
- S.A.R.H., 1982. — Analysis de suelos y aprovechamiento de materiales arrojados por el Volcán Chichonal (Chichón), 1982. Rapport du « Secretaria de Agricultura y Recursos Hidraulicos », Dir.Gen., Conservación de Suelo y Agua, Tuxtla-Gutierrez, Chiapas, non publié.
- SIMON (C.), 1984. — Violent history of El Chichón. *Sci. News*, May 19, 1984, Vol. 125, n° 20 : 309.