

Enregistrement scientifique n°: 2598

Symposium n°: 31

Présentation : Poster

## **Erodibility of an indurated volcanic tuff (*tepetate*) recently cultivated in Mexico**

## **Erodibilidad d'un tuf volcanique induré (*tepetate*) mis en culture au Mexique**

## **Erodibilidad de una toba volcánica endurecida (*tepetate*) recién cultivada en México**

**PRAT Christian, BÁEZ Aurelio.**

Orstom, AP 57297, México DF, México. prat@mpl.orstom.fr

In the central Mexico, the soil erosion could conduce to the apparition of a weathered volcanic tuff, called locally «*tepetate*». Due to the hardness and the lack of porosity of this indurated and sterile layer, the water runoff on it, eroding more and more this perturbed areas. Obviously, this *tepetate* is impossible to cultivate in this conditions. In spite of this characteristics, it is possible to create a new soil from this material, using a bulldozer, terracing the ground, fertilizing and sowing adapted cultures. But, to make profitable this investments, it is necessary to control the possible soil erosion and reach immediately a good crop production.

Within the framework of a research program, managed by the French institute ORSTOM and the Mexican Colegio de Postgraduados with the help of the European Union, different systems of culture and *tepetate* management have been tested on eight large terraces (700 to 1 800 m<sup>2</sup>) during four years in the eastern part of the Mexico valley. The main factor of the erosive process had been studied in details during and after rainfalls with rain-gauge, limnigraph, runoff separator, sedimentation tank, rugosimeter, moisture sampling, etc.

In spite of the short time of registration and of the variability of the climatic year, we could show that the climate is not so aggressive: the annual erosivity coefficient (Rus) is between 55 to 150. Nevertheless, few erosive rainfalls (16/year) are enough to destroy the new *tepetate* soil if it is not well managed and protected.

On the natural *tepetate*, 75% of the rain runoff with a coefficient of 40 to 50%, meanwhile the soil erosion varies from 10 to 30 t/ha/year, with an average of 20 t/ha/year. The solid charge is less than 30% and the erosion is more a gully erosion than a laminar erosion. On the *tepetate* reclaimed, we could distinguish clear differences between the monoculture from the other treatments. In the first case, and specially with the corn which is producing stem flows, the runoff and soil erosion have high values (8 t/ha/year meanwhile the other treatments as well as the natural soil, have very low values of runoff and soil erosion (1 t/ha/year). The erosion of the natural and new soil is mainly laminar.

With easy and simple technics, we could show that it is possible to control the erosion of this new soils as well as obtain a high crop productivity. This conditions are necessary to guarantee the high amount of investments which are indispensable to convert an eroded and sterile area in a productive land, helping in that way the development of the small Mexican farmers.

Mots clés : Mexique, sol volcanique induré, *tepetate*, restauration agricole, érosion, ruissellement, encroûtements, système de cultures, champs.

Keywords : Mexico, indurated volcanic soils, *tepetate*, agricultural rehabilitation, erosion, run-off, crusting, culture systems, fields.

Palabras claves : México, suelo volcánico endurecido, *tepetate*, restauración agrícola, erosión, escurrimiento, encostramientos, sistemas de cultivos, campos.

Enregistrement scientifique n°: 2598  
Symposium n°: 31  
Présentation : Poster

**Erodibility of an indurated volcanic tuff (*tepetate*)  
recently cultivated in Mexico**  
**Erodibilidad d'un tuf volcanique induré (*tepetate*) mis  
en culture au Mexique**  
**Erodibilidad de una toba volcánica endurecida  
(*tepetate*) recién cultivada en México**

**PRAT Christian, BÁEZ Aurelio.**

Orstom, AP 57297, México DF, México. prat@mpl.orstom.fr

Depuis la colonisation espagnole, les petits paysans de la région centrale des hauts plateaux mexicains (une des plus densément peuplée au Mexique) ont été repoussés des plaines vers les piedmonts des volcans, zones qu'ils cultivent depuis (Navarro et Prat, 1996). Or ces sols, fragiles et s'érodant facilement, recouvrent un horizon induré, connu par les paysans mexicains sous le nom de «*tepetates*». Cet horizon, qui est en fait un tuf volcanique induré et stérile, couvre des dizaines de milliers de kilomètres carrés le long de l'axe néovolcanique (Zebrowski, 1992). Sous les effets de la combinaison de facteurs du milieu naturel et humain, l'érosion s'amplifie progressivement, conduisant ainsi à l'extension des *tepetates*. Des estimations laissent à penser que plus du quart de la surface des piedmonts présente des affleurements de *tepetates* (Servenay, 1997). Indurés, compactes et stériles, ces matériaux sont incultivables en l'état.

Par manque de connaissances scientifiques, la plupart des opérations de récupération des *tepetates*, qui ont débuté il y a déjà plus de 30 ans, se sont presque toujours soldées par un échec. Pourtant, depuis 10 ans, des programmes de recherche se sont développés autour de cette problématique (Navarro et Zebrowski, 1994). C'est dans ce cadre, qu'une série d'essais réalisés notamment avec le soutien de l'Union Européenne<sup>1</sup>, ont permis de préciser les conditions de mise en culture et de développement de l'agriculture sur ces nouveaux sols (Quantin, 1992; 1997).

Il apparaît ainsi, que la mise en culture des *tepetates* est techniquement et financièrement possible et qu'elle reste à la portée des petits paysans concernés (Báez *et al.*, 1997; Márquez *et al.*, 1992; Prat *et al.*, 1997). Toutefois, ces mesures impliquent un contrôle de l'érosion et une bonne gestion de la production afin de rentabiliser les lourds

---

<sup>1</sup> Ce programme regroupait l'ORSTOM (France) et le Colegio de Postgraduados en Agrociencias de Montecillo (Mexique) dans la partie orientale de la vallée de Mexico et l'Université de Giessen (Allemagne) et l'Université Autonome de Tlaxcala (Mexique) dans l'état de Tlaxcala, à l'est de la vallée de Mexico.

investissements qu'exige le défonçage et le terrassement de ces matériaux (Zebrowski et Sánchez, 1997).

## Objectif

Cette étude a pour objectif de caractériser les processus érosifs en fonction des conditions du milieu naturel, de traitements du sol et de systèmes culturaux. Les résultats permettront alors d'effectuer des recommandations adaptées aux caractéristiques climatiques et humains. C'est sur cet axe de recherche qu'une équipe de l'ORSTOM et du Colegio de Postgraduados s'est penchée de 1992 à 1996 et dont une partie des résultats de ces travaux est présentée ici.

## Méthodologie

Un pluviographe et trois pluviomètres distribués sur nos parcelles ont été relevés chaque matin pendant la saison des pluies. Chaque terrasse a été équipée d'un limnigraphe et d'une série de partiteurs (deux de 1 m<sup>3</sup> et un de 100 l). Après chaque pluie, le volume total de ruissellement et l'ensemble des sédiments (séchés en étuve pour homogénéisation des résultats) ont été mesurés et des échantillons d'eau ont été prélevés pour analyses. Après chaque événement important (une à deux fois/semaine en moyenne), le couvert végétal, les états de surface (rugosimètre de 2 m<sup>2</sup>), les griffes d'érosion et les ruptures de billons ont été suivis. Enfin, ces données ont été complétées par des observations, des prélèvements et des mesures effectuées sous la pluie au cours d'une dizaine d'événements pluviométriques tout au long de ces quatre années.

Nous avons testé sur huit terrasses (700 m<sup>2</sup>), plusieurs systèmes de culture et de traitements du sol (Tableau 1). Les paramètres agronomiques ont fait l'objet de suivis détaillés, tout comme les aspects du comportement de l'eau dans le sol (Báez *et al.*, 1998).

Tableau 1. Caractéristiques des terrasses après défonçage et terrassement du *tepetate*.

(\* Profondeur défonçage, \*\* Non défoncé \*\*\* Billons cloisonnés, O: Orge, V: Vesce, M: Maïs, H: Haricot, F: Fève, Md: Medicago polymorfa)

Traitements	Ref.	Surface m <sup>2</sup>	Substrat	Prof.* m	Pente %	1993	1994	1995	1996
Référence <i>tepetate</i> nu et non défoncé	T0	1 800	<i>Tepetate</i> nu	**	2 a 10	-	-	-	-
Effet profondeur du défonçage	T2	470	<i>Tepetate</i> défoncé	0.60	4.7	O + V	M+H+F	M + F	O + Md
Référence monoculture	T3	775	“	0.46	3.2	O	M	M	O
Effet apport fumier	T4	730	“	0.43	3.4	O + V	M+H+F	M + F	O + Md
Effet préparation fine du sol	T5	790	“	0.44	2.5	O + V	M+H+F	M + F	M+ F***
Référence <i>tepetate</i> cultivé.	T6	1150	“	0.40	4.4	O + V	M+H+F	-	-
Idem, mais réduction de taille de la parcelle à partir de 1995.	T6a	735	“	0.40	4.4	-	-	M + F	M + F
Référence sol (phaeozem)	T7	715	Sol en place	0.53	5.9	O + V	M+H+F	M + F	O + Md

## Caractéristiques des pluies

En principe, 90% des précipitations tombent au cours de la saison des pluies (mai à octobre) (Tableau 2). Toutefois, en 1995 et en 1996, près du quart des pluies se produisirent au cours de la saison sèche (novembre à avril). Dans notre zone, 90% des événements pluviométriques ont une intensité inférieure à 5 mm/h. La durée des pluies

est inférieure à 30 mn pour la moitié d'entre elles, et parmi celles-ci, 30% ne dépassent pas les 15 mn. Leur intensité maxima se produit au cours du premier quart d'heure.

Tableau 2. Principales caractéristiques des pluies de la région de Texcoco (1992-1996).

	1992	1993	1994	1995	1996	92-96
Nombre de jours avec pluie	126	81	105	120	90	105
Hauteur totale (mm)	654	411	736	768	583	627
Nombre de jours de pluies enregistrées avec le pluviographe	193	132	148	154	109	147
Hauteur des pluies enregistrées avec le pluviographe	654	396	594	529	418	518
% de hauteur de pluies enregistrées avec pluviographe par rapport à la pluviométrie annuelle totale (enregistrement avec pluviomètre)	100	96	81	69	72	83
R métrique	259	96	216	197	204	194
R us	149	55	124	113	118	112
Essai de classification de l'année pluviométrique	Normale et érosive	Très sèche	Normale	Irrégulière	Sèche et Irrégulière	Année moyenne

Seules 10% des précipitations provoquent une forte érosion: 16 pluies d'une hauteur supérieure à 10 mm, représentent 50% du volume total des précipitations et 80% du facteur d'érosivité annuel selon Wischmeier (Rus annuel varie de 55 à 150 selon les années) et trois pluies ont une énergie supérieure 500 MJ/ha. Ces pluies ont des intensités de l'ordre de 50 à 150 mm/h pendant 5 à 10 mn (Prat, 1997).

Globalement, on peut donc considérer ce climat comme moyennement érosif. Toutefois, les variations interannuelles du facteur R étant très fortes (puisque R peut varier du simple au triple) le contrôle de l'érosion peut se révéler difficile certaines années. De plus, l'irrégularité des pluies, notamment en début de saison humide, en limitant le développement des cultures et donc la couverture du sol, augmente d'autant plus les risques d'érosion.

### Ruissellement et transport de matières solides

Le tableau de résultats (Tableau 3) montre une relation apparente entre le coefficient de ruissellement (Kr) et la quantité de sédiments transportés (Eros.), bien qu'il n'y ait pas de corrélation étroite entre ces deux paramètres (car le taux de ruissellement n'exprime pas l'énergie cinétique globale). Kr et Eros. varient en fonction des traitements testés et du degré d'érosivité des pluies de chaque année. Il apparaît clairement que le *tepetate* naturel non travaillé (T0) a les valeurs de Kr et Eros. les plus élevées alors que celles de T4, T5, T6 et T7 sont au contraire les plus faibles. Quant à T2 et T3, leurs résultats sont à mi-chemin entre les deux groupes précédents.

Tableau 3. Quantités de sédiments transportés (Eros. en t/ha en poids sec) et coefficient de ruissellement (Kr en %) pour les pluies ayant ruissellées (1993-1996).

Année	T0		T2		T3		T4		T5		T6		T7	
	Eros.	Kr												
1993	8.8	27.2	5.8	13.2	1.0	7.9	1.3	4.7	0.8	3.0	0.6	4.0	0.6	4.9
1994	28.9	50.7	15.5	31.2	12.0	38.6	3.7	17.3	1.4	10.3	1.6	13.3	0.1	0.8
1995	20.5	37.9	7.9	29.4	4.5	29.3	1.5	21.3	1.0	11.2	0.3	5.1	0.0	0.2
1996	18.2	53.3	11.0	49.7	13.7	53.4	1.6	30.3	0.1	4.0	0.8	18.5	5.0	29.8
Moyenne	19.1		10.1		7.8		2.0		0.8		0.9		1.4	

### Sédiments en suspension

Le taux de sédiments en suspension, en pourcentage du poids total de matériaux solides érodés est en relation avec la charge solide des eaux de ruissellement. Le tableau 4 rassemble les valeurs moyennes annuelles de 1993 à 1996 mesurées sur les différentes terrasses

Tableau 4. Pourcentage de sédiments en suspension (par rapport au poids total de sédiments).

Année	Terrasses							Culture principale
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
1993	38	52	57	53	44	46	48	Orge
1994	36	59	66	76	50	77	0	Maïs
1995	12	56	59	66	59	53	0	Maïs
1996	40	67	68	90	81*	80*	67	Orge / Maïs*
Moyenne	34	60	67	71	53	64	28	
Moy. 93+96	39	60	64	71	-	-	57	Orge
Moy. 94+95	24	58	62	71	55	65	0	Maïs

De ces résultats, on peut opposer le *tepetate* naturel non travaillé au sol et aux *tepetates* travaillés. Le *tepetate* naturel (T0) présente un faible pourcentage de sédiments en suspension (un peu plus de 30% en année moyenne), ce qui indique la prédominance d'une érosion linéaire sous l'effet d'un fort ruissellement. Au cours de ces quatre années, les observations montrent notamment, un approfondissement des rigoles qui constituent le réseau d'écoulement de ce micro-bassin versant. Sur toutes les terrasses de *tepetate* et de sol cultivées, c'est au contraire l'effet direct de l'énergie des pluies qui prédomine et qui génère une érosion sélective des particules fines. Ainsi, pendant les années les plus érosives (1994 et 1996), le taux de ruissellement augmente entraînant un pourcentage élevé (70%) de particules fines. A l'inverse, les années peu érosives (1993), ce taux n'est en moyenne que de 50%. Il est donc dépendant de l'intensité et de l'énergie des pluies.

En 1993, 1994 et 1995, il n'y a pas de différence hautement significative entre les traitements car le processus érosif initial est le même pour tous. Seul change ensuite le volume ruisselé et transporté en fonction de l'aptitude de chaque terrasse à infiltrer et retenir le ruissellement et les sédiments.

## Analyse des résultats en fonction des traitements testés

### *Le tepetate naturel (T0)*

Sur le *tepetate* naturel (T0), 75% des pluies ruissellent avec un Kr compris entre 30 et 50%. La charge solide est constituée principalement de sables et de limons. Selon les années, les valeurs varient de 10 à 30 t/ha/an, avec une moyenne de 20 t/ha/an. Ces valeurs, bien que fortes, ne sont pourtant pas extraordinaires par rapport à d'autres situations au Mexique même ou dans d'autres parties du monde.

Le *tepetate* naturel, compact et très peu poreux limite drastiquement l'infiltration de l'eau. Celle-ci ruisselle et se concentre provoquant une érosion en griffes et en rigoles en haut de colline (zone de mesures). Sa compacité limite également la destruction et l'arrachage des matériaux. Plus bas en aval, l'érosion régressive devient très importante (estimation de plusieurs centaines de tonnes/ha/an). C'est cette dernière forme d'érosion qui explique la formation du paysage actuel de collines profondément entaillées par des ravines de plusieurs dizaines de mètres de profondeur et de large.

### *Le tepetate cultivé (T2 à T6)*

Malgré l'apparente homogénéité du site, on peut noter des différences stationnelles entre T2 et les autres terrasses. Des analyses plus fines d'études notamment de la perméabilité, de la porosité, de la densité, de lames minces, montrent que le *tepetate* mis en culture en T2 est plus dense et compact, et surtout présente des agrégats beaucoup plus fragiles que dans les autres essais (Rugama, 1997). De plus, la densité des plantes étant de 20 à 30% plus faible que pour les autres terrasses en cultures associées, la protection du sol en début de cycle est moins bien assurée. Ce sont ces facteurs qui expliquent les taux si élevés de ruissellement et de transport de matériaux.

Les valeurs fortes de Eros. et de Kr pour T3 sont comparables à celles de T2. Nous avons pu attribuer ces différences à la monoculture puisque seule T3 n'est pas cultivée en association. Les mesures et suivis des états de surface montrent clairement que la couverture végétale y est plus réduite. Les agrégats étant moins bien protégés, ils se détruisent plus rapidement que sur les autres terrasses (d'où un Eros. important). Il se forme alors une pellicule de battance qui favorise le ruissellement (Kr élevé). De plus, le maïs en interceptant les gouttes de pluies et en concentrant l'eau sur la tige, provoque alors la rupture des billons au niveau des pieds même de chaque plant de maïs. Ce phénomène de "stem flow" est notablement réduit dans le cas de l'association maïs/fève car la fève intercepte et disperse les gouttes d'eau. Le simple suivi de l'état des billons montre des différences très nettes entre monoculture et cultures associées. La fève en limitant le "stem flow" du maïs, diminue les ruptures de billons et donc l'érosion (Lauffer *et al.*, 1997).

T4, dont le traitement diffère des autres terrasses par un apport régulier de fumier de bovin, associé certaines années à un ajout minimum d'engrais minéraux, présente des valeurs de Eros. et Kr intermédiaires entre T2-T3 et T5-T6. Pourtant, les mesures des états de surface ainsi que des tests de stabilité structurale montrent que les agrégats de cette parcelle sont plus stables et les macroagrégats (> 2 mm) plus nombreux que ceux des autres essais. Ces données coïncident avec les effets structurants et protecteurs bien connus de la matière organique, et ce d'autant plus, que le *tepetate* naturel possède à l'origine moins de 0.05% de matière organique. Ces caractéristiques sont donc en

contradiction avec les valeurs de Eros. et Kr plus élevées que celles qui étaient attendues. En fait, cette situation s'explique par des problèmes de gestion et de dosage de la fumure des parcelles. En effet, suite à des retards dans les dates d'application et à des doses de fertilisation trop faibles par rapport aux besoins des plantes, les cultures se sont développées de façon irrégulière. Ainsi, de nombreuses taches où les plantes étaient rares, parsemaient cette terrasse. La protection du sol n'étant plus assurée, le ruissellement et le transport de particules fines ont pu apparaître et se développer beaucoup plus que sur les autres essais.

T5 et T6 présentent peu de différences, montrant ainsi que la préparation initiale du sol (fine/grossière et plane/légère pente) a finalement eu peu d'impact. Les faibles valeurs de Eros. et Kr s'expliquent par une bonne protection du sol, liée aux associations de plantes qui se sont développées parfaitement tout au long du cycle de culture. Les rendements observés sur ces deux terrasses comptent d'ailleurs parmi les meilleurs et les plus réguliers. On notera qu'en dernière année, l'essai de billons cloisonnés s'est révélé très satisfaisant (deux fois moins d'érosion) par rapport au billonnage simple. Toutefois, il est nécessaire de confirmer cet essai, notamment dans le cas d'une année au cours de laquelle les pluies seraient très agressives.

#### *Le sol de référence (T7)*

T7, correspondant au sol en place (Phaeozem vertique) qui recouvre les *tepetates*, présente des valeurs de Eros. et Kr qui sont faibles et variables. Même si des croûtes de battance se forment rapidement, la cohésion de ces sols limite la dégradation et la rupture des billons. Le rôle protecteur de la culture associée s'est là aussi révélé important dans la réduction des processus érosifs.

Toutefois, des observations qualitatives sur des champs environnants, montrent que sur des longues pentes, l'eau en s'accumulant et en se concentrant, provoque en bas de champs ou des versants, une érosion en griffes qui évolue très rapidement en rigoles. Le *tepetate* sous-jacent affleure alors, provoquant une érosion en ravine.

### **Conclusions**

A partir de l'analyse fine des caractéristiques pluviométriques sur cinq ans, on peut considérer ce climat comme moyennement érosif. Toutefois, les très fortes variations interannuelles et annuelles (notamment en début de saison humide), rendent difficiles un bon contrôle de l'érosion. Il est donc primordial de prévoir, dans le cadre de la mise en culture des *tepetates* de la région de Mexico, des moyens et techniques visant à réduire au minimum l'érosion.

Un *tepetate* nu et affleurant génère de grands volumes d'eau et de sédiments, même à l'occasion de hauteurs (quelques millimètres) ou d'intensités (quelques mm/h) de pluie très faibles. Dans ces conditions, si rien n'est fait, les surfaces érodées de *tepetates* ne peuvent qu'augmenter et le milieu naturel ne peut que continuer à se dégrader. Quant aux gens qui vivent dans ces régions, ils doivent en subir les conséquences: érosion, champs impropres à toute culture, risques d'inondation, etc. Pourtant, après un défonçage (40 cm de profondeur) du *tepetate* par un bulldozer et un terrassement adéquate, il est possible de créer de nouveaux sols. Il faut alors assurer une bonne fertilisation aux cultures, afin non seulement d'obtenir de bons rendements, mais aussi

d'assurer rapidement une bonne couverture végétale qui protégera les agrégats assez fragiles, de l'impact des gouttes de pluies. Le maïs se développant mal en première année de mise en culture, on sèmera une céréale de petits grains (orge, blé, etc.). On prêtera d'autant plus d'attention à ces cultures à semis à plat que leur Kr et leurs pertes en terre sont supérieurs à ceux du maïs. C'est pourquoi, il est important d'assurer une bonne fertilisation et de les associer à une légumineuse telle que la luzerne (*Medicago P.* plutôt que la vesce qui entre en compétition avec les céréales). De façon générale, on utilisera de préférence des associations plutôt que des monocultures. En particulier, on associera le maïs à la fève dont le port du feuillage permet de contrebalancer les effets de stem flow du maïs qui provoquent la destruction des billons. Il faut également veiller à effectuer les travaux de nettoyage des cultures quand les sols sont frais et non saturés afin de conserver une bonne agrégation du sol et de retarder la formation des encroûtements. Enfin, le billonnage croisé semble réduire de façon importante le ruissellement et les transports de matériaux solides.

Le rôle de la fumure organique et de l'incorporation des résidus de culture n'est pas apparu clairement dans le contrôle de l'érosion. En effet, bien que les agrégats soient plus nombreux et plus stables que dans les autres essais, l'insuffisance des doses et les retards dans l'application de la fumure ont conduit à une mauvaise couverture du sol qui a favorisé l'érosion. Si la recommandation d'apport de fumure organique n'est ni économiquement rentable ni techniquement généralisable (pas assez de fumier disponible dans la région), reste la proposition d'enfouir les résidus de culture, au moins dans les premières années après le défonçage du *tepetate*.

Les résultats de quatre ans de suivis de l'érosion sur des parcelles de taille paysanne, montre que le *tepetate* affleurant non travaillé génère un ruissellement et une érosion importante qu'il est nécessaire de contrôler pour éviter une extension de ces affleurements. Le défonçage, la formation de terrasses et la mise en culture des *tepetates* permettent d'aboutir à la création de sols productifs. Toutefois, il est indispensable de suivre un ensemble de recommandations pour s'assurer une bonne production agricole et un contrôle efficace de l'érosion de ces sols fragiles. C'est dans ces conditions que l'on pourra garantir la rentabilité économique des investissements et la durabilité de ces aménagements.

## **Bibliographie**

Báez A., Ascencio E., Prat C. et Márquez A. 1998. Conditions for agricultural uses of an indurated volcanic tuff (*tepetate*). In: Transaction of the 16<sup>th</sup> World congress of soil science, Montpellier, France.

Báez A., Ascencio E., Prat C. et Márquez A. 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco (México). In: Zebrowski *et al.* (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 déc. 1996. Orstom, Quito, Ecuador. pp. 296-310.

Lauffer M., Leroux Y. Prat C. et Janeau JL. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (México). In: Zebrowski *et al.* (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 déc. 1996. Orstom, Quito, Ecuador. pp. 443-456.

Marquez A., Zebrowski C. et Navarro H. 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. Terra, Vol 10, N° especial. Orstom-CP, Mexico. pp. 465-473.

Navarro H. et Prat C. 1996. Habilitación agrícola de los tepetates de los valles de México y de Tlaxcala. *In*: P. Bovin (Ed.), El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas. CEMCA-ORSTOM. Mexico. pp. 253-291.

Navarro H. et Zebrowski C. 1994. La réhabilitation agricole des sols volcaniques indurés et érodés en Equateur et au Mexique. *In* : Transaction of the 15<sup>th</sup> World congress of soil science, Acapulco, Mexico. Vol 6a, pp. 592-610.

Prat C. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan (Texcoco, Mexico). *In*: Zebrowski *et al.* (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 déc. 1996. Orstom, Quito, Ecuador. pp. 359-370.

Prat C., Báez A. et Márquez A. 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México. *In*: Zebrowski *et al.* (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 déc. 1996. Orstom, Quito, Ecuador. pp. 371-383.

Quantin P. 1992. Etude des sols volcaniques indurés "*tepetates* des bassins de Mexico et de Tlaxcala", en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final, contrat CEE/ORSTOM: NTS2-A-212-C.

Quantin P. 1997. Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine (Chili, Equateur, Mexique). Rapport scientifique final, contrat UE/ORSTOM-U.J.L. Giessen: ERB TS3\*CT93 0252. 178 p.

Rugama U., J. A. 1997. Evolución estructural del tepetate t3, producto de la roturación y manejo agrícola. Tesis de Maestría, Instituto de Recursos Naturales. Montecillo, México, Colegio de Postgraduados. 105 p.

Servenay A. 1997. Les paysages de *tepetates* du Mexique central volcanique: identification et caractérisation spatiale par télédétection et SIG des zones agricoles à réhabiliter. Mémoire DEA, Univ. Toulouse-le Mirail, ORSTOM, 90 p.

Zebrowski C. 1992. Los suelos volcanicos endurecidos de América Latina. Terra, Vol 10, numero especial. Orstom-CP, Mexico. pp. 15-23.

Zebrowski C. et Sánchez B. 1997. Los costos de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos. *In*: Zebrowski *et al.* (Eds), Actas del 3<sup>e</sup> simposio internacional sobre los suelos volcánicos endurecidos. 6-12 déc. 1996. Orstom, Quito, Ecuador. pp. 462-471.

Tous nos remerciements aux responsables et au personnel des laboratoires de fertilité et de physique des sols du C.P., au CIMMYT (Centro de Investigación y Mejoramiento del Maíz y Trigo) et à l'INIFAP Chapingo pour leur aide et conseils; ainsi qu'à la communauté paysanne de San Miguel Tlaixpan qui nous a prêté les terrains d'expérimentation.

Mots clés : Mexique, sol volcanique induré, *tepetate*, restauration agricole, érosion, ruissellement, encroûtements, système de cultures, champs.

Keywords : Mexico, indurated volcanic soils, *tepetate*, agricultural rehabilitation, erosion, run-off, crusting, culture systems, fields.

Palabras claves : México, suelo volcánico endurecido, *tepetate*, restauración agrícola, erosión, escurrimiento, encostramientos, sistemas de cultivos, campos.