

Érosion et restauration de sols volcaniques indurés « tepetates » de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique

Paul QUANTIN (1), Christian PRAT (2) et Claude ZEBROWSKI (1)

(1) Orstom, 32, avenue Henri-Varagnat, 93143 Bondy cedex, France.

(2) CPM, 56230 Chapingo, Mexique.

RÉSUMÉ

Au Mexique, sur le haut plateau central, dans les États de Mexico et de Tlaxcala, l'érosion a fait affleurer des horizons indurés de sols volcaniques, appelés « tepetates ». Une étude de la restauration de sols agricoles sur ces matériaux stériles et de leur conservation a été réalisée. L'étude concerne notamment les propriétés des tepetates qui limitent l'infiltration de l'eau et leur fertilité ainsi que celles qui sont favorables à la restauration d'un sol agricole fertile et stable.

Cet exposé présente les résultats majeurs à propos de l'érosivité des pluies, du ruissellement et de l'érosion, de l'évolution des états de surface, des rendements des cultures et de la rentabilité de cette restauration en milieu paysan.

La valeur cumulée d'érosivité annuelle des pluies ($E \times I_{30}$ de Wischmeier) mesurée sur quatre stations expérimentales, pour une pluviosité moyenne annuelle de 700 à 800 mm et six mois de pluie, varie de faible (200 en R_{USA}) à moyenne (400 en R_{USA}). Le nombre de pluies érosives varie de quatre à treize ; mais le nombre de pluies moyennement à fortement érosives varie de zéro à cinq seulement. Les pluies fortement érosives ($I_{30} > 50$ mm/h et $E \times I_{30} > 1\ 000$ MJ/ha \times mm/h) sont rares. La majeure partie du ruissellement et de l'érosion est due aux quelques pluies vraiment érosives.

Sur tepetate nu et non travaillé le ruissellement des pluies érosives varie de 70 à 90 % ; mais l'érosion est limitée entre 5 et 10 t/ha/an. L'effet d'un simple sous-solage profond réduit de moitié le ruissellement et l'érosion. Mais la fragmentation et la culture d'un tepetate laissé à nu, sans façon antiérosive, augmentent très fortement son instabilité, l'érosion atteignant des valeurs de 22 à 128 t/ha selon l'érosivité des pluies, bien que le taux de ruissellement soit compris entre 35 et 45 %.

C'est la fraction fine, inférieure à 2 mm, qui est responsable de l'instabilité du tepetate cultivé et de l'érosion, ainsi que de la formation de croûtes qui réduisent l'infiltration. Il faut donc limiter au minimum le travail du tepetate.

Sur tepetate cultivé, l'effet du billonnage, avec ou sans couvert de maïs, est très efficace sur les pluies faiblement érosives, réduisant à 10 % le ruissellement et à 1 t/ha/an l'érosion. Mais les pluies fortement érosives augmentent le ruissellement à plus de 20 % et surtout l'érosion à près de 26 t/ha/an. Il est recommandé de limiter les façons culturales et de cloisonner les billons pour réduire les risques d'érosion lors de fortes pluies.

La productivité des tepetates cultivés, avec fertilisation minérale (N 60-120 et P 60) et avec ou sans fumure organique, devient bonne en seulement trois à cinq années de culture. En première année, le blé et la vesce ont un rendement presque normal ; le maïs et le haricot au contraire ne produisent pas, par carence probable de micro-organismes symbiotes. Un amendement organique avec insémination de symbiotes spécifiques pourrait résoudre ce problème. Dès la troisième année, les rendements de maïs sont normaux et en cinquième année ils sont optimaux.

Un important travail de « roturación » et terrassement, une fertilisation minérale ou organique modérée et une rotation culturale adaptée (blé, puis maïs-fève-haricot) permettent au paysan mexicain la restauration rapide (trois à cinq ans) d'un sol agricole. Cette opération est rentable sur huit années de culture ; mais elle suppose pour les

petites exploitations de moins de 20 ha par famille une certaine aide de l'État (travaux à moindre coût, financement à intérêt réduit). C'est une ressource en sol quasi nécessaire pour les petits paysans, outre qu'elle est rentable et durable.

MOTS CLÉS : Mexique — Tepetate — Érosion — Restauration — Sols indurés.

ABSTRACT

SOIL RESTORATION AND CONSERVATION FROM THE "TEPETATES" INDURATED VOLCANIC SOILS IN THE MEXICO AND TLAXCALA STATES (MEXICO)

Introduction. The volcanic soils of the central high plateau in Mexico often have some indurated horizons, locally named « tepetates ». The erosion of superficial soil leaves barren areas over the piedmonts and plateaus of the Mexico Valley and Tlaxcala Country. Indeed it is a serious problem in these countries, densely populated and traditionally dedicated to subsistence crops. Therefore numerous studies and trials have been made in order to reclaim the tepetate soils.

Rehabilitating fertile soils. The major constraints of tepetates are: a very narrow porosity which hinders air and water infilling as well as rooting; a lack of organic matter and nitrogen; a severe deficiency in available phosphorus. The methods for restoring a fertile soil are: a deep subsoiling and an appropriate breaking of tepetate layer by special tillage; terracing for soil and water conservation; fertilizing by mineral nitrogen and phosphorus, and sometimes manure addition.

Soil conservation trials, rainfall erosivity index and soil erodibility. Trials have been made in small plots at four experiment stations by comparing the behaviour of barren tepetates with cultivated ones under various treatments. The average rainfall ranges from 600 to 800 mm/year. The dry season is six months long. The rainfall erosivity index is fairly low, from 200 to 400 (in American units Wischmeier index). Only few (1 to 5 per year) rainfalls are effectively erosive (I_{30} value > 30 mm/hour and $E \times I_{30} > 400$ MJ/ha \times mm/h). On a natural barren tepetate the average runoff amounts to about 70 % of the whole rainfall; but the soil loss is only 5 to 10 t/ha/year. On a cultivated tepetate without crop the runoff is reduced, but the soil loss increases from 22 to 128 t/ha/year, according to the rainfall erosivity values. On a cultivated tepetate with maize and with furrowing and ridging against slope, the runoff is strictly controlled between 5 and 20 % while the soil loss is strongly reduced between 1 and 26 t/ha/year, according to the rainfall erosivity values. Nevertheless the cultivated tepetates are not perfectly stable. Some encrusting of soil surface develops with time and hinders more and more the rainwater infilling.

Crop trials, productivity and crop profits. Four crops, such as maize (corn), wheat and two bean species, as well as vetch (for green manure) have been tested using only N and P mineral fertilizers or adding manure. Wheat and vetch grow fairly well and give rather good yields from the first year of cultivation, while maize and beans grow badly and give very poor yields, even after manure fertilizing. However the soil productivity for maize and beans quickly improves after 2 or 3 years of cultivation, so crop yields become good enough after only 3 to 5 years. A socio-economic inquiry conducted by several families of farmers shows that tepetate reclaiming is an important soil resource for small farms (< 20 ha/family). Owing to good yields obtained from the third year of cultivation it is expected to pay off almost all reclaiming investments after about eight years of cultivation. However some financial assistance is needed from the State departments such as capital loan and reclaiming works at the cheapest cost, as well as some instructions for suitable and appropriate management.

KEYWORDS : Mexico — Tepetate — Erosion — Restoration — Indurated soils.

RESUMEN

EROSIÓN Y REHABILITACIÓN DE SUELOS VOLCÁNICOS ENDURECIDOS « TEPETATES » DE LA REGIÓN DE MÉXICO Y DE TLAXCALA, MÉXICO

En México, en la alta meseta central, en los estados de México y de Tlaxcala, la erosión ha provocado el afloramiento de capas endurecidas de suelos volcánicos llamadas « tepetates ». Se realizó un estudio de la rehabilitación de suelos agrícolas en esos materiales estériles y de su conservación.

El estudio abarca en especial las propiedades de los tepetates que limitan la infiltración del agua y su fertilidad, así como de aquellas que son favorables a la restauración de un suelo agrícola fértil y estable.

Este artículo presenta los resultados más importantes relativos a la erosividad de las lluvias, al escurrimiento superficial y a la erosión, a la evolución de los estados de superficie, a los rendimientos de los cultivos y a la rentabilidad de dicha restauración en el ámbito campesino.

El valor acumulado de erosividad anual de las lluvias ($E \times I_{30}$ de Wischmeier) medido en cuatro estaciones experimentales para una pluviosidad promedio anual de 700 a 800 mm y 6 meses de lluvia, varía de bajo (200 en U. Am.) a mediano (400 en U. Am.). El número de lluvias erosivas varía de 4 a 13, pero el de lluvias mediana a fuertemente erosivas va solo de 0 a 5. Las lluvias fuertemente erosivas ($I_{30} > 50$ mm/h y $E \times I_{30} > 1\ 000$) son escasas. La mayor parte del escurrimiento superficial y de la erosión se debe a las pocas lluvias verdaderamente erosivas.

En tepetate desnudo y no trabajado, el escurrimiento superficial de las lluvias erosivas varía del 70 al 90 %, pero la erosión se limita a 5 a 10 t/ha/año. El efecto de un simple subsoleo profundo reduce en un 50 % el escurrimiento superficial y la erosión. Sin embargo, la fragmentación y el cultivo de un tepetate dejado al desnudo, sin medidas anti-erosivas, aumenta considerablemente su inestabilidad, y la erosión tiene valores de 22 a 128 t/ha/año según la erosividad de las lluvias, aunque la tasa de escurrimiento superficial se reduce solamente en un 35-45 %.

Es la fracción fina, inferior a 2 mm, la responsable de la inestabilidad del tepetate cultivado y de la erosión, al igual que del encostramiento que reduce la infiltración. Se debe entonces limitar a lo mínimo el trabajo del tepetate.

En tepetate cultivado, el efecto de los camellones, con o sin cobertura de maíz, es muy eficaz para lluvias debilmente erosivas, reduciendo al 10 % el escurrimiento superficial y a 1 t/ha/año la erosión. Sin embargo, las lluvias fuertemente erosivas aumentan el escurrimiento superficial en más del 20 % y sobre todo la erosión a 26 t/ha/año. Se recomienda limitar las labores de cultivo y compartimentar los camellones para reducir los riesgos de erosión al producirse lluvias fuertes.

La productividad de los tepetates cultivados, con fertilización mineral (N 60-120 y P 60), y con o sin abono orgánico, se torna buena en solo 3 a 5 años de cultivo. En un primer año, el trigo y la veza tienen un rendimiento casi normal ; por el contrario, el maíz y el frijol no producen, por una probable carencia de micro-organismos simbiotes. Un abono orgánico con inseminación de simbiotes específicos podría resolver tal problema. Desde el tercer año, los rendimientos de maíz son normales y a partir del quinto año son óptimos.

La restauración de los tepetates como suelo agrícola, con un importante trabajo de roturación y terraceo, al igual que una fertilización mineral y orgánica moderada, una rotación de cultivo adecuada (trigo y luego maíz-haba-frijol) permite al campesino mexicano la rápida restauración (3 a 5 años) de un suelo agrícola. Esta operación es rentable en 8 años de cultivo, pero implica, para las pequeñas explotaciones de menos de 20 ha/familia, una cierta ayuda del Estado (trabajos al menos costo, financiamiento con bajos intereses). Es un recurso en suelos casi necesario para los campesinos, además de ser rentable y sostenible.

PALABRAS CLAVES : México — Tepetate — Erosión — Restauración — Suelos endurecidos.

INTRODUCTION

Les sols du haut-plateau central mexicain présentent des horizons indurés, appelés localement « tepetates » (« lits de pierre » en nahuatl). Ceux-ci apparaissent surtout après l'érosion du sol superficiel sur les piémonts des massifs volcaniques et les plateaux, qui laisse à nu des surfaces quasi stériles. Leur superficie dans la vallée de Mexico, au pied de la Sierra Nevada, et dans la région de Tlaxcala représente 30 à 40 % des terres vouées à l'agriculture vivrière. L'insuffisance de terres agricoles est un problème grave dans cette région surpeuplée, proche de la mégapole de Mexico. C'est pourquoi de gros efforts sont faits (de-

puis près de vingt ans) avec l'appui des États pour réhabiliter les tepetates en terres fertiles et également contrôler l'érosion.

L'aménagement consiste en une *roturación* (sous-solage profond, labour et pulvérisage par des disques), pour fragmenter, ameublir et permettre l'infiltration de l'eau et de l'air, puis un remodelage en terrasse, généralement en pente, avec ados et bande d'arrêt isohypse. Une fertilisation organique (si possible) et minérale pallie la carence initiale en azote, phosphore, et produits organiques éventuellement (humus, microorganismes). Une rotation culturale adaptée à l'expérience des agriculteurs, blé ou orge d'abord, puis maïs et haricot, permet d'assurer la

transition d'un sol stérile à un sol fertile. La production devient normale à partir de trois à cinq années de culture (MARQUEZ *et al.*, 1992 ; QUANTIN, 1992).

Un premier programme de la Communauté européenne (CCE-STD2), entre 1989 et 1992, a été consacré à l'étude des tepetates (caractères, origine et propriétés) ; puis à la mesure de l'érosion sur des petites parcelles ; enfin au suivi agronomique et socio-économique d'essais de réhabilitation agricole. Un rapport de synthèse (QUANTIN, 1992) en présente les résultats majeurs.

Un second programme (CCE-STD3) commence. Il est davantage orienté vers l'expérimentation à l'échelle paysanne de la « régénération et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine », notamment en Équateur et au Mexique.

L'objet de cet article est de présenter brièvement les résultats du premier programme concernant la mesure de l'érosion en petites parcelles dans la vallée de Mexico et la région de Tlaxcala, ainsi que quelques données de la production agricole au cours des premières années de remise en culture. Nous donnerons aussi un aperçu des premières mesures de bilan hydrique et d'érosion du second programme (PRAT *et al.*, 1993).

MESURE DE L'ÉROSION

L'étude de l'érosion a été réalisée sur des petites parcelles expérimentales, pour la plupart de 22 m × 2 m (normes de Wischmeier), avec une pente moyenne de 8 à 9 %. Les tepetates testés, de deux types, t2 et t3 (QUANTIN, 1992), ont une consistance de fragipan (dure à l'état sec, friable à l'état humide). Ils contiennent de 30 à 40 % d'argile. Leur cohésion est due à l'empilement face à face des argiles et probablement un peu de silice (gel, opale) intercalaire (HIDALGO, 1995). Leur porosité totale est de 40 à 55 %, mais leur macroporosité est faible, généralement inférieure à 5 %, voire nulle ; de sorte que la conductivité hydraulique est très faible, inférieure à 1 mm/h, et la porosité à l'air est très restreinte. C'est pourquoi ils affleurent lors de l'érosion du sol et demeurent stériles.

Les mesures ont été faites sur quatre stations (San Miguel Tlaixpan, El Carmen, Matlahochan, Tlalpan), dans des conditions semblables d'altitude (2 500 à 2 600 m), de pente (8 à 9 %) et de climat ($T = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P = 700\text{-}800\text{ mm}$) ; elles ont permis de tester une variation locale du régime et de l'intensité des pluies. Nous avons comparé un sol agricole normal cultivé (à nu ou avec maïs billonné) à un tepetate mis à nu par l'érosion et à un tepetate avec *roturación*, à nu, ou couvert d'une plante cultivée (blé à plat, maïs en billon). Nous avons mesuré les pluies (pluviogramme), le volume d'eau ruisselée et le poids de terre érodée. En outre, nous avons effectué des mesure périodiques : humidité du sol, densité-porosité et granulométrie. Nous avons enfin suivi l'évolution des états de surface, à

savoir la formation de croûtes, la diminution de taille des agrégats et la vitesse d'infiltration.

Les principaux résultats concernent l'analyse de l'érosivité des pluies ($E \times I_{30}$), du ruissellement et de l'érosion, et l'évolution des états de surface.

Érosivité des pluies

Le régime climatique hygrothermique est de type « ustic-isomesic » ($T_m = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P_m = 700\text{ à }800\text{ mm}$). La saison des pluies, de mai à octobre pendant la période estivale, alterne avec six mois de saison sèche et un peu plus froide.

L'analyse de l'érosivité des pluies a été faite à partir des pluviogrammes de l'année 1991, enregistrés dans les quatre stations. L'indice $E \times I_{30}$ de WISCHMEIER (1958) a été converti en unités américaines, pour être comparé à d'autres données de la littérature. Les calculs en unités internationales de I_{30} (mm/h) et $E \times I_{30}$ (MJ/ha × mm/h) ont également été faits. Nos collègues allemands (BAUMANN, 1992) ont pour leur part calculé l'indice d'érosivité AIm (LAL, 1976). Toutes ces données sont rassemblées dans le rapport de synthèse (QUANTIN, 1992). Nous ne présenterons ici que les résultats majeurs et leur interprétation.

Le tableau I donne les valeurs de la pluviosité et de l'indice cumulé d'érosivité pour les quatre stations.

La pluviosité a été supérieure de près de 100 mm sur le versant de Tlaxcala (El Carmen, Tlalpan et Matlahochan), en regard du versant de Texcoco dans la vallée de Mexico (San Miguel Tlaixpan). Il y a donc un effet de versant. En outre, pour une même quantité globale de pluie sur le versant de Tlaxcala, le nombre de jours de pluies et surtout leur intensité et leur indice d'érosivité varient : la valeur de $E \times I_{30}$ oscille entre 234 et 429. Plus le régime est irrégulier (à Matlahochan), plus il est érosif. Cet effet est confirmé (voir ci-après) par les mesures de ruissellement et d'érosion.

TABLEAU I
Pluviosité et érosivité des pluies en 1991
Rainfall and erosivity (1991)

Station	Pluies		Érosivité	
	H (mm)	Nbre jours	$E \times I_{30}$ ⁽¹⁾	AIm ⁽²⁾
San Miguel T.	669	99	200	
El Carmen	779	120	234	261
Tlalpan	803	112	357	330
Matlahochan	775	96	429	418

(1) Indice de Wischmeier (unités américaines).

(2) Indice de Lal.

Les valeurs calculées de l'indice d'érosivité, en 1991, se situent dans le rang d'observations (entre 200 et 600) de ROOSE (1981) en région « tropicale sèche ». Ces valeurs

varient donc de faibles à moyennes. En fait, le nombre de pluies effectivement érosives est très réduit, si l'on se réfère aux valeurs de I_{30} et $E \times I_{30}$ calculées et aux résultats concernant les pertes en terre observées après chaque pluie. Le tableau II présente ces pluies exceptionnelles et les classe pour chaque station par ordre d'intensité érosive.

Chaque station, pour une pluviosité semblable, se différencie donc par le nombre et surtout l'intensité des pluies

érosives : à San Miguel, seulement quatre pluies peu érosives ; à El Carmen, trois peu érosives et trois moyennement érosives ; à Tlalpan, trois peu érosives, trois moyennement érosives et deux fortement érosives ; à Matlahocan, neuf peu érosives, trois moyennement érosives et une fortement érosive. Il y a peu d'événements érosifs chaque année mais ils sont responsables de 60 à 80 % de l'érosion totale.

TABLEAU II
Pluies érosives en 1991 : nombre, intensité, érosivité
Erosive rainfalls (1991) : number, intensity, erosivity

	Peu érosive		Moyennement érosive	Fortement érosive	Total
I_{30} (mm/h)	25-30		30-50	> 50	
$E \times I_{30}$ (MJ/ha x mm/h)	100-200	200-400	400-1000	> 1000	
San Miguel T.	4	-	-	-	4
El Carmen	-	3	3	-	6
Tlalpan	-	3	3	2	8
Matlahocan	-	9	3	1	13

Les valeurs de l'indice AIm proposé par Lal pour les régions tropicales sont proches de celles de $E \times I_{30}$. Le calcul de $E \times I_{30}$ pour les petites pluies est sujet à discussion ; cela influe sur la valeur cumulée annuelle, et la précision n'est pas suffisante pour établir une corrélation avec l'intensité du ruissellement et de l'érosion. Il conviendrait de faire une analyse plus fine des pluviogrammes au pas de temps de 10 min, voire de 5 min, pour mieux exprimer l'effet de fortes intensités de pluie pendant une courte durée.

Ruissellement et érosion

Des mesures ont été faites en 1990 et en 1991, respectivement en première et en deuxième année après la *roturación* du tepetate. Mais nous ne présenterons dans le tableau III que les résultats concernant le ruissellement et l'érosion obtenus en 1991 sur les quatre stations. C'est la seule année où nous avons utilisé la même plante cultivée (maïs en billon) sur toutes les stations. C'est aussi l'année où nous disposons de l'analyse de l'érosivité des pluies, du suivi du régime hydrique des sols et de l'évolution des états de surface au cours de la saison des pluies.

Les tepetates t2 et t3 mis à nu par l'érosion ont un comportement semblable. Le taux de ruissellement moyen annuel est voisin de 70 %. Il n'est pas total car les premières pluies et les petites pluies s'infiltrent par les fentes de retrait. Mais le ruissellement atteint 80 à 90 % lors des fortes pluies. L'érosion est normalement faible, entre 5 et 10 t/ha/an (sauf cas exceptionnel sur t3 à Tlalpan), du fait de la compacité et de la stabilité du tepetate originel.

Un seul sous-solage profond du tepetate, laissé à nu, réduit à 40 %, soit de moitié, le ruissellement (mesuré en 1990), ainsi que l'érosion à 2 t/ha/an ; il y a amélioration de l'infiltration et de la rugosité de surface, sans déstabilisation des agrégats.

L'effet d'une *roturación* complète du tepetate (sous-solage suivi de plusieurs labours profonds et pulvérisages à disques, pour obtenir un agrégat optimal en première année, puis un labour profond en deuxième année), laissé à nu, est variable selon l'érosivité des pluies : sur la station la moins érosive (San Miguel Tlalpan), le taux de ruissellement est de 10 à 20 % et l'érosion de 21 t/ha/an. Dans la région de Tlaxcala, avec des pluies plus intenses, le ruissellement atteint 30 à 40 % ; et surtout l'érosion augmente rapidement à 72-78 t/ha/an sur la station d'El Carmen avec des pluies moyennement érosives et à 128 t/ha/an sur la station de Tlalpan avec deux pluies fortement érosives. Sans ouvrage antiérosif, ni couverture végétale, le tepetate avec *roturación* et labouré est donc très érodible. Les agrégats fins sont instables.

L'effet du billonnage, que le tepetate cultivé soit non couvert ou planté en maïs, est spectaculaire sur la station la moins érosive (San Miguel Tlalpan) : le ruissellement est réduit à 5 % sous couvert de maïs et à 12 % sur sol nu, et l'érosion à 1 t/ha dans les deux cas. Mais avec l'intensité des pluies, même sous couvert de maïs, le ruissellement augmente à 10 % sur la station modérément érosive (El Carmen) et à 20 % sur la plus érosive (Tlalpan) ; et surtout l'érosion s'accroît sensiblement à 23 t/ha/an sur le tepetate t2 à El Carmen et 26 t/ha/an sur le tepetate t3 à Tlalpan (station la plus érosive). À partir d'un certain

TABLEAU III
Mesures de perte en terre et de ruissellement en 1991
Sediment loss and runoff measures (1991)

Station	Traitement	Longueur (m)	Érosion (t/ha)	Ruissellement (%)
San Miguel T.	1. T t3, nu	22	5,05	88 ⁽¹⁾
	2. T, L, nu	22	21,89	44 ⁽¹⁾
	3. T, L, B, nu	22	1,04	12 ⁽¹⁾
	4. T, L, B, maïs	22	1,24	5 ⁽¹⁾
	5. T, L, B, maïs	10	1,18	5 ⁽¹⁾
	6. Sol, L, B, nu	22	1,10	12 ⁽¹⁾
	7. Sol, L, B, maïs	22	1,79	11 ⁽¹⁾
El Carmen	t3 T, nu	3	8,0	70 ⁽²⁾
	t2 T, nu	3	6,3	67 ⁽²⁾
	t2 T, L, nu	22	78,0	34 ⁽²⁾
	t2 T, L, B, maïs	22	23,0	11 ⁽²⁾
Tlalpan	t3 T, nu	3	41,0	68 ⁽²⁾
	t2 T, nu		7,5	65 ⁽²⁾
	t3 T, L, nu	22	128,0	43 ⁽²⁾
	t3 T, L, B, maïs	22	26,0	21 ⁽²⁾
Matlahocan	t3 T, nu	6	8,8	75 ⁽²⁾
	t3 T, R, arbustes	6	26,0	61 ⁽²⁾
	Sol, nu	22	47,0	34 ⁽²⁾
	Sol, savane	22	0,3	10 ⁽²⁾

T : tepetate (t2 ou t3). L : sous-solé et labouré. R : sous-solé. B : billonné.
Érosion : perte en terre globale. Ruissellement : en % du volume des pluies.
(1) Estimation moyenne sur les trois pluies les plus érosives.
(2) Pourcentage du total des pluies.

seuil, le ruissellement n'est plus contenu et il y a risque de rupture des billons et d'érosion forte. En outre, l'effet de couverture du maïs, dont le développement est trop tardif, sur l'érosion n'est pas évident dans la station faiblement érosive (San Miguel Tlaixpan) ; mais la comparaison avec un sol billonné à nu n'a pas été faite sur les stations plus érosives.

Sur le sol originel (avant érosion) sous savane arbustive naturelle, il n'y a qu'un faible taux de ruissellement (10 %), et pratiquement pas d'érosion, bien qu'il s'agisse de la station la plus érosive (Matlahocan). Sur le même sol privé de son manteau végétal et dans la même station, le ruissellement monte à 34 % et l'érosion à 47 t/ha/an. Le sol étant labouré, l'effet du billonnage est efficace dans la station faiblement érosive, aussi bien sur sol nu que cultivé en maïs, restreignant le ruissellement à 11-12 % et l'érosion à 1-2 t/ha/an. Ce résultat est proche de celui observé sur un tepetate cultivé, bien que le sol soit moins stable que le tepetate. Ce serait sans doute différent pour des

pluies plus érosives, mais cela n'a pas été mesuré. Nous n'avons pas non plus fait d'observations sur le sol cultivé et non billonné à nu dans la station faiblement érosive.

En 1992, de nouvelles mesures ont été effectuées sur le tepetate naturel (t3), à San Miguel Tlaixpan, mais sur une grande parcelle de 1 800 m² (au lieu de 44 m²) et une pente de 8 à 10 % (PRAT *et al.*, 1993), afin de vérifier l'effet dimensionnel. Le régime des pluies a été semblable à celui de 1991 (90 jours de pluie, trois à quatre pluies érosives seulement). Le tableau IV présente les valeurs de l'érosivité et du ruissellement en fonction du nombre de pluies, pendant la période de mesure (78 pluies seulement).

Pendant cette période, la perte en terre globale a été de 10 t/ha/an environ, soit le double de ce qui a été mesuré sur petite parcelle, à la station de San Miguel Tlaixpan, mais du même ordre de grandeur que sur l'ensemble des quatre stations (5 à 10 t/ha/an). Le taux de ruissellement des pluies érosives ($E \times I_{30} > 80$) est supérieur à 70 %. Cela confirme donc les résultats de 1991.

TABLEAU IV
Mesures d'érosivité et de ruissellement sur tepetate nu en 1992
Erosivity and runoff on bared tepetate (1992)

Pluies		Exl ₃₀	Ruissellement
Nombre	(%)	(MJ/ha x mm/h)	(%)
40	53	< 7	< 40
15	20	7 à 25	40 à 50
10	13	25 à 80	50 à 70
3	4	> 80	> 70

Les résultats obtenus sur tepetate sont comparables à ceux observés sur la « cangahua » en Équateur (CUSTODE

et al., 1992) durant une période de cinq années (1987-1991), pour une pluviosité moyenne de 660 mm (proche de celle de la station la moins érosive, San Miguel Tlaixpan, mais sur une pente plus forte, 22 %) (tabl. V).

Les valeurs mesurées sur sol originel sont comparables, en ce qui concerne le taux de ruissellement, à celles mentionnées par ROOSE (1981) en région « tropicale sèche » sur des sols ferrugineux tropicaux et pour une pluviosité moyenne annuelle de 850 mm : sous savane, 10-15 % ; sur sol nu, 35-43 % ; sur sol cultivé, 10-40 %. L'érosion y est également très faible sous savane : 0,2 à 0,7 t/ha/an ; modérée sur sol cultivé : 1 à 14 t/ha/an ; mais un peu moins élevée sur sol nu : 10 à 35 t/ha/an. Dans l'ensemble, les ordres de grandeur sont semblables.

TABLEAU V
Ruissellement et érosion sur cangahua de l'Équateur
Runoff and erosion on Ecuadorian cangahua

Traitement	Ruissellement (%)		Érosion (t/ha)
	moyen	maximal	
Cangahua nue, cultivée en surface	20-30	60-90	96,6
Cangahua cultivée, culture traditionnelle	7-14	30-55	18,9
Cangahua cultivée, culture améliorée	2-9	9-55	4,5

Évolution des états de surface

Les états de surface ont été observés, selon la méthode de CASNAVE et VALENTIN (1989), par J.-L. Janeau et son élève G. JÉROME (1992), sur des parcelles de tepetate avec *roturación* et de sol cultivés en maïs avec billonnage, ainsi que sur un tepetate laissé à nu. Ces observations ont été faites en six fois : au début et à la fin des trois périodes de façons culturales (du semis au premier sarclage ; jusqu'au second sarclage et buttage du maïs ; jusqu'à la récolte). Cette étude comporte l'observation de la formation de croûtes (structurales et de dépôt), des formes d'érosion, de la fonte des agrégats, des modifications du modelé ; ainsi que des mesures de porosité, de vitesse d'infiltration et d'humidité du sol. Ces observations ont permis de suivre le processus qui conditionne l'évolution du comportement au ruissellement et à l'érosion.

Dans le cas du sol et du tepetate cultivés en maïs avec billonnage, le comportement se modifie par suite de la formation de croûtes superficielles, structurales sur les billons ou de dépôt dans les dépressions. Sur le sol, l'évolution est rapide, car la fonte totale des agrégats est elle-même rapide et très importante (50 à 80 % en fin de culture). Sur le tepetate cultivé, l'évolution est plus lente et progressive, car les agrégats de plus de 2 mm sont plus stables et leur fonte n'est que partielle (réduction de taille). Au cours de la première période culturale (jusqu'au premier sarclage), l'évolution est lente, les agrégats sont sta-

bles et l'infiltration demeure rapide. Mais, au cours de la deuxième période et surtout de la troisième, le processus s'accélère : la fonte des agrégats s'accroît, la formation de croûte s'intensifie et se généralise, la porosité diminue et se rapproche de l'état initial avant *roturación*, la vitesse d'infiltration se ralentit fortement et devient faible (tabl. VI). En conséquence, le ruissellement et la susceptibilité à l'érosion s'accroissent. En fait, ce sont les agrégats de taille inférieure à 2 mm qui fondent totalement et alimentent la formation des croûtes et les pertes en terre. Une expérimentation en laboratoire avait montré que l'agrégat « optimal » se situe vers 3 mm, pas en dessous. Par conséquent, une fragmentation excessive du tepetate (pulvérisages, sarclages) en une fraction de moins de 2 mm favorise l'encroûtement, le ruissellement et l'érosion. Contrairement à ce que l'on pensait, le tepetate labouré n'est pas stable, même sous couvert de maïs ; les agrégats diminuent de taille, ceux inférieurs à 2 mm fondent, le matériau se tasse et s'encroûte. Il faut limiter au mieux la fragmentation, en évitant de pulvériser ; d'autres appareils et méthodes sont à expérimenter. La méthode mexicaine de billonnage du maïs, en trois opérations successives de labour, de sarclage et de buttage, en intensifiant la fragmentation, est donc dangereuse. Il conviendrait de faire le billon en une seule fois et de semer le maïs sur le billon. En outre, les billons devraient être cloisonnés, pour réduire les risques de rupture brutale lors de fortes pluies.

TABLEAU VI
Évolution de la porosité (P) et vitesse d'infiltration (Vi)
Evolution of the porosity (P) and infiltration velocity (Vi)

Période	1		2		3	
	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
Tepetate						
P (%)	58,1	53,2	57,7	54,3	51,1	50,6
Vi (mm/h) - sur billon	96	45	48	28	21	10
- sur sillon	52	16	24	12	8	2
Sol						
P (%)	56,4	50,9	55,3	51,5	50,0	48,9
Vi (mm/h) - sur billon	68	32	16	8	10	4
- sur sillon	52	0	12	2,4	5	0

Tepetate initial : P = 44 % ; Vi = 0,3 à 0,5 mm/h.

Dans le cas du tepetate cultivé, mais non billonné et laissé à nu, la surface initialement motteuse se couvre progressivement d'une croûte structurale par fonte des agrégats fins ; puis une croûte de dépôt se forme dans les petites dépressions. Le ruissellement augmente et la surface se couvre de fines griffes d'érosion, qui s'approfondissent lors de fortes pluies ; l'érosion s'accroît. Sans façons culturales, le tepetate cultivé devient donc facilement érodible par les fortes pluies.

SUIVI AGRONOMIQUE ET PRODUCTIVITÉ

Les analyses préalables du tepetate en laboratoire et une expérimentation en serre ont montré que ce matériau présente des contraintes qui sont responsables de sa stérilité : trop faibles macroporosité et conductivité hydraulique, carence en matière organique, azote et phosphore, ainsi qu'en micro-organismes symbiotes de certaines plantes cultivées (maïs, haricot). Mais il a aussi des propriétés favorables à la régénération d'un sol fertile : 30 à 40 % d'argile, soit (après amélioration structurale) une bonne rétention de l'eau et des éléments utiles à la plante, une microporosité importante et une assez bonne stabilité structurale ; ainsi qu'un pH neutre ou faiblement alcalin, une teneur suffisante en éléments Ca, Mg, K et oligo-éléments. C'est pourquoi la réhabilitation d'un sol agricole peut être rapide, rentable et durable, après le rétablissement d'une bonne structure, et à l'aide d'une fertilisation modérée en N et P (suivant les besoins de la plante) et, si possible, d'une fumure organique.

La récupération agricole des tepetates était pratiquée à l'époque préhispanique, mais manuellement, avec des amendements organiques, et déjà en terrasses antiérosives (*metepantles*). Ce travail, après avoir été délaissé, est devenu d'actualité ; il est maintenant mécanisé, les cultu-

res et techniques de fertilisation ont changé. Afin d'évaluer les méthodes, la productivité et l'intérêt économique, nous avons réalisé un suivi agronomique sur des parcelles expérimentales (MARQUEZ *et al.*, 1992), ainsi que des observations et une enquête socio-économique chez les paysans (ZAHONERO, 1992). Nous ne présenterons que les principales conclusions concernant l'évolution de la productivité en fonction du temps de culture et la rentabilité de cette réhabilitation.

Évolution de la productivité

La fertilité et la productivité augmentent jusqu'à un niveau normal en seulement trois à cinq années de culture. Mais toutes les plantes n'ont pas la même aptitude en première année : le maïs et le haricot produisent peu, même sur un sol de tepetate bien ameubli et fertilisé, alors que le blé et la vesce ont un rendement normal. C'est pourquoi une expérimentation systématique a été conduite en première année. En outre, des observations ont été faites sur des parcelles remises en culture depuis deux à cinq années et plus (NAVARRO et ZEBROWSKI, 1992 ; MARQUEZ *et al.*, 1992).

En première année de culture, nous avons comparé quatre plantes traditionnelles : blé, maïs, haricot et fève, ainsi que la vesce, susceptible d'être cultivée comme engrais vert. Nous avons testé l'effet d'une texture fine (50 % de particules de moins de 2 mm) ou grossière, d'une fertilisation minérale seule (NP : 0-60/60-60/60-120), ou accompagnée de fumier (40 t/ha). Les résultats majeurs sont donnés dans le tableau VII et les figures 1 à 5.

Les tepetates cultivés peuvent donc produire dès la première année de culture, pour le blé, la vesce et la fève ; mais pas pour le maïs et le haricot. Il est nécessaire de préparer une texture assez fine (< 2 mm). Mais nous avons vu que cela présente un risque d'érodibilité important.

TABLEAU VII
Rendement des cultures sur tepetate (t/ha)
Yields of different crops on tepetate (t/ha)

	Maïs	Haricot	Fève	Blé	Vesce
1 ^{re} année ⁽¹⁾	0-0,2	0,1-0,2	0,3-0,8	2-4 *	2-4 **
3 ^e année ⁽¹⁾	2,2-2,5	-	-	1,5	-
5 ^e année ⁽¹⁾	2,5-3,1	-	-	-	-
Moyenne ⁽²⁾	1,8	0,75	1,33	2	-

(1) Année de culture depuis la « roturation »; avec fertilisation minérale sans fumure organique.

(2) Moyenne des rendements de la région.

* Blé sur parcelles expérimentales et texture fine ; sur les autres parcelles, 1,2 t/ha (moyenne, 1,5 t/ha).

** Vesce sur parcelles expérimentales, rendement en matière sèche.

Sans apport de fumier, une terre fine et une fertilisation minérale modérée de N 120 et P 60 permettent de produire 4 t/ha de blé, 4 t/ha de vesce et 0,4 t/ha de fève. Avec apport de fumier et 60 unités de P (sans complément d'azote), le blé peut produire 6 t/ha, la vesce 6 t/ha et la fève 0,8 t/ha. Dans ce cas, une fertilisation azotée est inutile, voire dépressive, pour le blé.

L'échec de la culture de maïs et de haricot en première année semble dû à une carence ou déficience en micro-organismes symbiotes, nécessaires à la bonne nutrition de la plante (ALVAREZ-SOLIS *et al.*, 1992 ; Ferrera, 1993, comm. pers.).

En vue de résoudre le problème de la fertilisation organique des tepetates avec *roturación*, en l'absence de fumier ou de compost, la vesce ou une graminée fourragère (avoine) pourraient être utilisées comme engrais vert. L'insémination de symbiotes spécifiques permettrait un bon rendement du maïs et du haricot.

En deuxième année, sur une parcelle expérimentale, sans fumure organique mais avec une fumure minérale (N 120, P 80), le maïs a produit de 1,2 à 1,7 t/ha. En troisième année, les rendements du maïs (variété locale) sont de 2,2 à 2,5 t/ha et en cinquième année ils atteignent 2,5 à 3,1 t/ha. La productivité est donc bonne pour cette région (moyenne de 1,8 t/ha).

Rentabilité de la réhabilitation agricole d'un tepetate

Une enquête sur les « systèmes économiques familiaux » (ZAHONERO, 1992) a révélé que les tepetates réhabilités représentent une ressource en terre agricole importante, voire nécessaire, pour les petites exploitations de moins de 20 ha par famille. Grâce à des aménagements en terrasse, on obtient une bonne protection contre l'érosion. La rotation culturale est adaptée suivant l'âge de remise en culture : blé en première année, puis maïs-fève-

haricot. Progressivement, les cultures de subsistance (maïs, fève, haricot) prédominent sur les cultures de rente (blé, orge).

La productivité devient normale dès la troisième année de culture. Cela permet d'amortir le coût du travail de réhabilitation (coût assumé par le paysan, compte tenu d'une aide de l'État) en huit années normales. La rentabilité des investissements financiers sans l'aide de l'État est discutable pour des exploitations de moins de 15 ha, qui vivent en autosubsistance et ne peuvent dégager le capital nécessaire, à moins de bénéficier d'un apport de salaire extérieur. Dans le cas d'exploitations de plus de 15 ha, des cultures de rente (blé, orge) peuvent favoriser l'acquisition du capital nécessaire. De toute manière, il faudra l'aide de l'État pour fournir la prestation de travaux à moindre coût.

CONCLUSION

L'ensemble des résultats montre que les tepetates de type fragipan, après un aménagement adapté, constituent une ressource agricole durable et de bonne productivité. Cette ressource est quasi nécessaire pour les exploitations de moins de 20 ha par famille.

Les pluies érosives dans les régions de Mexico et de Tlaxcala sont peu nombreuses. Le tepetate ayant été soumis à une *roturación* est assez stable et peu érodible si l'on évite une fragmentation trop fine (moins de 2 mm).

L'effet du billonnage en culture de maïs est très efficace en station peu érosive, mais il est insuffisant en cas de pluies très érosives ($I_{30} > 50$ mm/h). Sans billonnage ni couvert végétal, le tepetate cultivé devient rapidement instable et très érodible. La répétition des façons culturales (labour plus deux travaux de sarclage et buttage pour le maïs au Mexique) accélère la fonte des agrégats, la formation d'une croûte, le ruissellement et l'érosion. Il faut

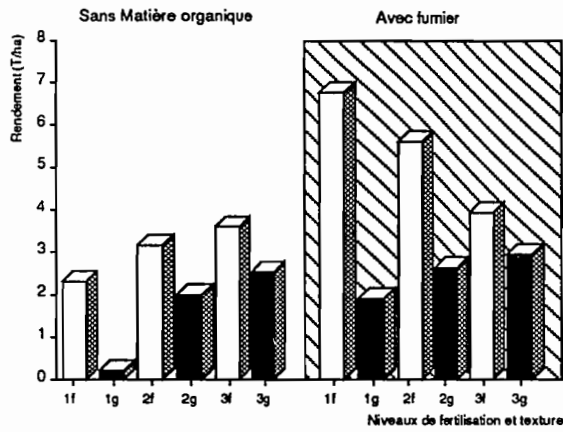


FIG. 1. — Influence des traitements sur le rendement du blé (première année).
Influence of treatments on the wheat yield (first year).

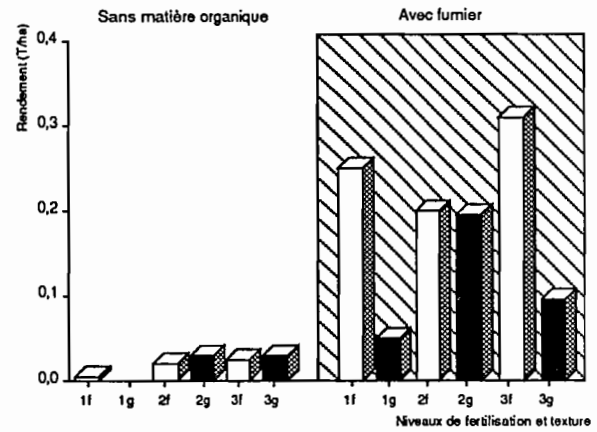


FIG. 2. — Influence des traitements sur le rendement du maïs (première année).
Influence of treatments on the maize yield (first year).

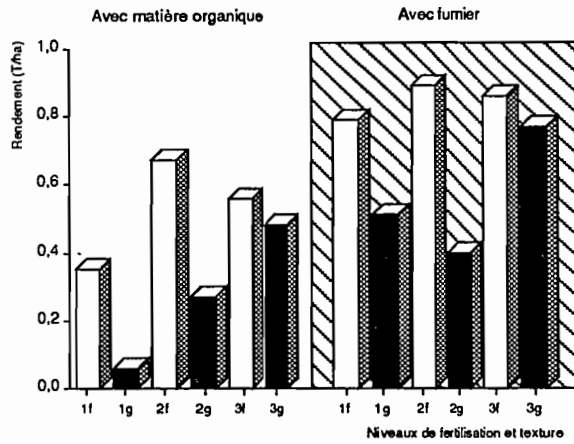


FIG. 3. — Influence des traitements sur le rendement de la fève (première année).
Influence of treatments on the broad bean yield (first year).

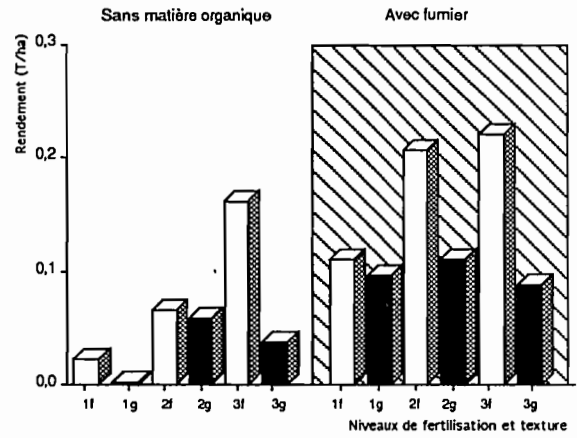


FIG. 4. — Influence des traitements sur le rendement du haricot (première année).
Influence of treatments on the bean yield (first year).

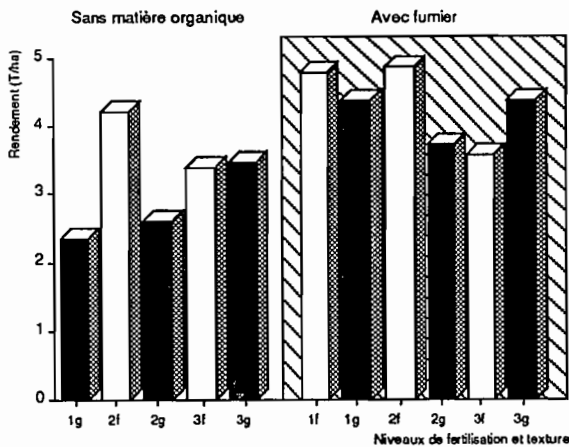


FIG. 5. — Influence des traitements sur le rendement de la vesce (première année).
Influence of treatments on the vetch yield (first year).

Texture
 fine
 grossière

Niveaux de fertilisation (NPK)
 1 = 0 - 60 - 0
 2 = 60 - 0
 3 = 120 - 60 - 0

donc limiter la fragmentation du tepetate et la fréquence du travail du sol. En outre, il faut réaliser des billons cloisonnés, afin de réduire les risques d'érosion lors de fortes pluies.

Un tepetate, après *roturación* et amendement par une fertilisation minérale modérée (N 60 à 120, P 60) ou organique (fumier + P 60), peut être productif dès la première année pour certaines plantes telles que le blé et la vesce, moins pour la fève ; mais pas pour le maïs et le

haricot, sans doute par carence de micro-organismes symbiotes. Cependant, le rendement du maïs est normal dès la troisième année et devient optimal en cinq ans. Un amendement organique (fumier ou engrais vert) et l'insémination de symbiotes pourraient accélérer ce processus. L'opération est rentable malgré le coût des travaux qui peut être amorti en huit ans ; cela suppose une aide substantielle de l'État (travaux à moindre coût, prêt à intérêt réduit), surtout pour les petites exploitations.

BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ-SOLIS (J. D.), FERRERA-CERRATO (R.), ZEBROWSKI (C.), 1992 — Analisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. *Terra*, 10 (num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos ») : 419-424.
- BAUMANN (J.), 1992 — *Investigaciones sobre la erodibilidad y el regimen hídrico de los duripanes (tepetates) rehabilitados para los cultivos, en el bloque de Tlaxcala*. Rapport final du contrat CEE n° TS2-A212C, 26 p.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1989 — *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris, Orstom, coll. Didactiques, 232 p.
- CUSTODE (E.), DE NONI (G.), TRUJILLO (G.), VIENNOT (M.), 1992 — La cangahua en el Ecuador : caractérisación morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión. *Terra*, 10 (Num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos ») : 332-346.
- HIDALGO (C.), 1995 — *Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques, de la Vallée de Mexico*. Thèse Univ. Nancy I, Paris 1996, Orstom, TDM n° 146, 215 p.
- JÉROME (G.), 1992 — *Étude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, le tepetate, dans la vallée de Texcoco, Mexique. Comparaison avec un sol non induré*. Mémoire fin d'études, Inst. Sup. Tech. Outre-Mer, 104 p.
- LAL (R.), 1976 — Soil erosion in Alfisols in Western Nigeria. 3 — Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*, 16 : 389-401.
- MARQUEZ (A.), ZEBROWSKI (C.), NAVARRO (H.), 1992 — Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. *Terra*, 10 (Num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos ») : 465-473.
- NAVARRO (H.), ZEBROWSKI (C.), 1992 — *Étude des sols volcaniques indurés (tepetates) des bassins de Mexico et Tlaxcala (Mexique), leur production agricole*. Rapport final du contrat CEE n° TS2-A212C.
- PRAT (C.), OROPEZA (J.-L.), JANEAU (J.-L.), 1993 — « Resultados del primer año de investigación del programa Orstom-CP sobre la rehabilitación de los tepetates de Mexico ». Actas XII° Congr. Lat. Amer. Ciencia del Suelo, Salamanca, 1994, vol. III : 1367-71.
- QUANTIN (P.), 1992 — *Étude des sols volcaniques indurés « tepetates » des Bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole*. Rapport scientifique final du contrat CEE n° TS2-A212C, 77 p.
- ROOSE (E.), 1981 — *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Étude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, 130, 569 p.
- WISCHMEIER (W. H.), 1958 — Rainfall energy and its relationships to soil loss. *Trans. Amer. Geogr. Union*, 39 : 285-292.
- ZAHONERO (P.), 1992 — *Des lits de pierre sur l'Altiplano. Contribution à l'analyse de la mise en valeur des « tepetates », sols indurés d'origine volcanique, dans la région de Tlaxcala*. Rapport de fin d'études, CPSL/Orstom, 120 p.

Érosion et restauration de sols volcaniques indurés « tepetates » au Mexique : 175-185

Photos : P. Quantin



Paysage de sols à tepetate et sols érodés, piémont ouest de la Sierra Nevada, vallée de Mexico.

Tepetate mis à nu par l'érosion, près de Texcoco, vallée de Mexico.



Érosion en « barranca » de sol à tepetate, vallée de Mexico.



Couple de parcelles de tepetate cultivé, à nu (type Wischmeier) et sous maïs, pour mesure de l'érosion, Tlalpan, Tlaxcala, Mexique.



Mesure du ruissellement et de l'érosion sur une terrasse de tepetate cultivé, près de Texcoco, vallée de Mexico.



Défonçage du tepetate par passage croisé de sous-soleuse à dent (ripper).