

EROSION ET RESTAURATION DE SOL VOLCANIQUES INDURÉS "TEPETATES"
DE LA REGION DE MEXICO ET DE TLAXCALA, MEXIQUE

Paul Quantin, Christian Prat et Claude Zebrowski
ORSTOM - 72, Route d'Aulnay, 93143, Bondy Cedex, France.

Au Mexique sur le Haut-Plateau Central, dans les Etats de Mexico et Tlaxcala, l'érosion a fait affleurer des horizons indurés de sols volcaniques, appelés "tepetates". Une étude a été faite de la restauration de sols agricoles sur ces matériaux stériles et de leur conservation.

L'étude concerne notamment les propriétés des tepetates qui limitent l'infiltration de l'eau et leur fertilité et 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.I30 de Wischmeyer) mesurée sur 4 stations expérimentales, pour une pluviosité moyenne annuelle de 700 à 800 mm et 6 mois de pluies, varie de faible (200 en U.Am.) à moyenne (400 en U.Am.). Le nombre de pluies érosives varie de 4 à 13; mais le nombre de pluies moyennement à fortement érosives varie de 0 à 5 seulement. Les pluies fortement érosives ($I30 > 50$ mm/h et $E.I30 > 1000$) sont rares. La majeure partie du ruissellement et l'érosion sont dûs aux rares 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 anti érosive, augmente très fortement son instabilité et l'érosion à des valeurs de 22 à 128 T/ha selon l'érosivité des pluies, bien que le taux de ruissellement soit réduit entre 35 et 45 % seulement.

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 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 3 à 5 années de cultures. 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 ils sont optima.

La restauration des tepetates en sol agricole, avec un important travail de roturation et terrassement, ainsi qu'une fertilisation minérale ou organique modérée, une roturation culturale adaptée (blé, puis maïs-fève-haricot) permet au paysan mexicain la restauration rapide (3 à 5 ans) d'un sol agricole. Cette opération est rentable sur 8 années de culture; mais elle suppose pour les petites exploitations de moins de 20 ha/famille une certaine aide de l'Etat (travaux à moindre coût, financement à intérêt réduit).

EROSION ET RESTAURATION DE SOLS VOLCANIQUES INDURÉS "TEPETATES" DE LA RÉGION DE MEXICO ET DE TLAXCALA, MEXIQUE.

Paul Quantin, Christian Prat et Claude Zebrowski

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 érosion du sol superficiel, sur les piémonts des massifs volcaniques et les plateaux, laissant 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; elle affecte la majeure partie de la population paysanne. L'insuffisance de terres agricoles est un problème grave dans cette région surpeuplée, proche de la Mégapole de México. C'est pourquoi de gros efforts sont faits (depuis près de 20 ans) avec l'appui des Etats pour réhabiliter les tepetates en terre fertile et aussi contrôler l'érosion.

L'aménagement consiste successivement en : 1°, une "roturation" (sous-solage profond, labour et pulvérisage par des disques), pour fragmenter, ameublir et permettre l'infiltration de l'eau et de l'air; puis 2°, 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, micro-organismes). 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 3 à 5 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 : 1°, l'étude des tepetates (caractères, origine et propriétés); puis 2°, à la mesure de l'érosion sur des petites parcelles; enfin 3°, au suivi agronomique et socio-économique d'essais de réhabilitation agricole. Un rapport de synthèse (Quantin 1992) en présente les résultats majeurs.

Un deuxième programme (CCE-STD3) commence. Il est plus orienté vers l'expérimentation à l'échelle paysanne de la "régénération et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique Latine", notamment en Equateur et au Mexique.

L'objet de cet exposé 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, si nous en avons le temps, un aperçu des premières mesures de bilan hydrique et d'érosion du deuxième programme (Prat et al. 1993).

II. MESURE DE L'EROSION

L'étude de l'érosion a été réalisée sur des petites parcelles expérimentales, pour la plupart de 22 m x 2 m (normes de Wischmeier) et sur 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, mais sont faiblement cimentés probablement par de la silice. 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/heure, 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 ($T = 13^{\circ}\text{C}$, $P = 700\text{-}800$ 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; un tepetate "roturé", 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 fait des mesure périodiques de l'humidité du sol, densité-porosité et granulométrie. Nous avons aussi 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 : une analyse de l'érosivité des pluies (E.I30), ruissellement et érosion, et l'évolution des états de surface.

1. Erosivité des pluies

Le régime climatique hygro-thermique est de type "ustic-isomesic" ($T_m 13^{\circ}\text{C}$, $P_m 700$ à 800 mm). La saison des pluies, de mai à octobre pendant la période estivale, alterne avec 6 mois de saison sèche et un peu plus froide.

L'analyse de l'érosivité des pluies a été faite sur les pluviogrammes de l'année 1991, enregistrés dans les 4 stations. L'indice E.I30 de Wischmeier (1958) a été converti en unités américaines, pour être comparé à d'autres données de la littérature. Mais on a fait aussi les calculs en unités internationales de I30 (mm/h) et E.I30 (MJ/ha x mm/h). Nos collègues allemands (Baumann, 1992), ont aussi calculé l'indice d'érosivité Alm (de Lal, 1976). Toutes ces données sont rassemblées dans le rapport de synthèse (Quantin, 1992). Nous ne présenterons que les résultats majeurs et leur interprétation.

Le premier tableau (Tab. 1), montre la pluviosité et l'indice cumulé d'érosivité pour les 4 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 México (San Miguel Tlaixpan). Il y a donc un effet de versant. En outre pour une même quantité globale de pluies sur le versant de Tlaxcala, varient le nombre de jours de pluies et surtout leur intensité et leur indice d'érosivité : E.I30 de 234 à 429. Plus le régime est irrégulier

(à Matlahocan), plus il est érosif. Cet effet est confirmé (voire plus loin) par les mesures de ruissellement et d'érosion.

Tableau 1 - Pluviosité et érosivité des pluies en 1991.

Station	Pluies		Erosivité	
	Hmm	N jours	E.I30 (1)	Alm (2)
San Miguel T.	669	99	200	-
El Carmen	779	120	234	261
Tlalpan	803	112	357	330
Matlahocan	775	96	429	418

(1) Indice Wischmeier, Unités américaines

(2) indice de Lal

Les valeurs calculées d'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 faible à moyenne. En fait le nombre de pluies effectivement érosives est très réduit, si l'on se réfère aux valeurs I30 et E.I30 calculées et aux résultats de perte en terre observés après chaque pluies. Un tableau (Tab 2) présente ces pluies exceptionnelles et les classe par ordre d'intensité érosive, pour chaque station.

Tableau 2 - Pluies érosives en 1991 : nombre, intensité (1), érosivité (2)

Station	I30 :	PE		ME	FE	Total
		E.I30 :	25-30	30-50	> 50	
		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

(1) I30 : mmh/h - (2) E.I30 : MJ/ha x mm/h - PE : faiblement érosive - ME : moyennement érosive - FE : fortement érosive.

Chaque station, pour une pluviosité semblable se différencie donc par le nombre et surtout l'intensité des pluies érosives : à San Miguel seulement 4 pluies peu érosives; à El Carmen 3 peu érosives et 3 moyennement érosives; à Tlalpan 3 PE, 3ME et 2 fortement érosives; à Matlahocan 9 PE, 3 ME et 1 FE. Il y a peu d'événements érosifs chaque année; ils sont responsables de 60 à 80 % de l'érosion totale.

Les valeurs de l'indice Alm proposé par LAL pour les régions tropicales sont proches de celles de E.I30. Le calcul de E.I30 pour les petites pluies est sujet à discussion; cela influe sur la valeur cumulée annuelle et ce n'est pas assez précis 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.

2. Ruissellement et érosion

Des mesures ont été faites en 1990 et en 1991, respectivement en première et en deuxième année après la roturation du tepetate. Mais nous ne présenterons dans le tableau suivant (Tab. 3) que les résultats de ruissellement et d'érosion obtenus en 1991 sur les 4 stations; C'est la seule année où nous avons utilisé la même plante cultivée (maïs avec billon) sur toutes les stations. C'est aussi l'année où nous avons l'analyse de l'érosivité des pluies, le suivi du régime hydrique des sols et de l'évolution des états de surface au cours de la saison des pluies.

Tableau 3 - Mesure de perte en terre et de ruissellement en 1991

Station	Traitement	Long m	Erosion T/ha	Ruissellement %
S.M.T.	1. Tepetate t3 nu	22	5,05	88 (1)
	2. T. Labouré, nu	22	21,89	44 "
	3. T, L + Billon, nu	22	1,04	12 "
	4. T, L + B, maïs	22	1,24	5 "
	5. T, L + B, maïs	10	1,18	5 "
	6. Sol, L + B, nu	22	1,10	12 "
	7. Sol, L + B, maïs	22	1,79	11 "
El C.	t3 Tepetate nu	3	8,0	70 (2)
	t2 Tepetate nu	3	6,3	67 "
	t2 T, L nu	22	78,0	34 "
	t2 T, L + B, maïs	22	23,0	11 "
Tla	t3 Tepetate nu	3	41,0	68 (2)
	t2 Tepetate nu	3	7,5	65 "
	t3 T, L nu	22	128,0	43 "
	t3 T, L + B. , maïs	22	26,0	21 "
Mat	t3 Tepetate nu	6	8,8	75 (2)
	t3 T, R + arbustes	6	26,0	61 "
	Sol, nu	22	47,0	34 "
	Sol, savane	22	0,3	10 "

S.M.T. : San Miguel Tlaixpan - El C : El carmen - Tla : Tlalpan - Mat : Matlahocan - T : tepetate (t2 ou t3) - L : sous solé et labouré - R : sous solé - B : billonné. (1) estimation moyenne sur 3 pluies les plus érosives. - (2) % du total de pluie. - Long. : Longueur des parcelles - Erosion : perte en terre globale - Ruissellement : en % du volume 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 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 roturation complète du tepetate (sous-soulage suivi de plusieurs labours profonds et pulvérisages à disques, pour obtenir un agrégat optimum en première année, suivi d'un labour profond en deuxième année), laissé à nu, est variable selon l'érosivité des pluies : sur la station la moins érosive (S.M.T.), 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 avec des pluies moyennement érosives (El C.) et à 128 T/ha/an sur la station avec 2 pluies fortement érosives (Tla). Sans ouvrage anti-érosif ni couverture végétale le tepetate "roturé" 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 (S.M.T.) : le ruissellement est réduit à 5 % sous couvert de maïs et 12 % sur sol nu; et l'érosion à 1 T/ha dans les deux cas. Mais avec l'intensité des pluies, même sous couvert du maïs, le ruissellement augmente à 10 % sur la station modérément érosive (El C.) et à 20 % sur la plus érosive (Tla); et surtout l'érosion s'accroît sensiblement à 23 T/ha/an sur tepetate t2 à El Carmen et 26 T/ha/an sur tepetate t3 à Tlalpan (station la plus érosive). A partir d'un certain 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 sur la station faiblement érosive (SMT); 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 (Mat). Sur le même sol privé de son manteau végétal et sur la même station, le ruissellement monte à 34 % et l'érosion à 47 T/ha/an. 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 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 faites 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 pluies, 3 à 4 pluies érosives seulement). Le tableau 4 présente les valeurs

d'érosivité et de ruissellement en fonction du nombre de pluies, pendant la période de mesure (78 pluies seulement).

Tableau 4 - Mesures d'érosivité et de ruissellement sur tepetate nu en 1992.

Pluies nombre	%	E.I30 MJ/ha x mm/h	Ruissellement %
40	53	< 7	< 40
15	20	7 à 25	40 à 50
10	13	25 à 80	50 à 70
3	4	> 80	> 70

Pendant la période de mesures, la perte en terre globale a été de 10 T/ha/an environ, soit le double mesuré sur petite parcelle, sur la station S.M.T. mais du même ordre de grandeur que sur l'ensemble des 4 stations (5 à 10 T/ha/an). Le taux de ruissellement des pluies érosives (E.I30 > 80) est supérieur à 70 %. Ceci confirme donc les résultats de 1991.

Les résultats mesurés sur tepetate sont comparables à ceux observés sur la cangahua en Equateur (Custode, de Noni et al. 1992) sur une période de 5 années (1987-1991), pour une pluviosité moyenne de 660 mm (proche de la station la moins érosive SMT, mais sur pente plus forte, de 22 %), voir tableau 5.

Tableau 5 - Ruissellement et érosion sur cangahua d'Equateur.

Traitement	Ruissellement		Erosion T/ha
	moyen	maxi	
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

Les résultats mesurés sur sol originel sont comparables en ce qui concerne le taux de ruissellement à ceux mentionnés 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.

3. Evolution des états de surface

Les états de surface ont été observés selon la méthode Casenave et Valentin (1989) par Janeau et son élève G. Jerome (1992), sur des parcelles de tepetate roturé et de sol cultivés en maïs avec billonnage, ainsi que sur un tepetate laissé à nu. Ces observations ont été faites en 6 fois : au début et à la fin des 3 périodes de façons culturales (du semis au 1er sarclage; jusqu'au

2ème 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, vitesse d'infiltration et de l'humidité du sol. Ces observations ont permis de suivre le processus qui conditionne l'évolution du comportement au ruissellement et à l'érosion.

1. Dans le cas du sol et du tepetate cultivés en maïs avec billon, 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 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 1er sarclage), l'évolution est lente, les agrégats sont stables et l'infiltration demeure rapide. Mais au cours de la deuxième période et surtout 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 roturation, la vitesse d'infiltration se ralentit fortement et devient faible (Tab. 6). Donc le ruissellement et la susceptibilité à l'érosion s'accroissent. En fait ce sont les agrégats de taille < 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 "optimum" se situe vers 3 mm, pas en dessous. Donc une fragmentation excessive du tepetate (pulvérisages, sarclages) en une fraction < 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 et de sarclage 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 6 - Evolution de la porosité (1) et vitesse d'infiltration (2)

Période ->	1		2		3	
	1,1	1,2	2,1	2,2	3,1	3,2
Tepetate P	58,1	53,2	57,7	54,3	51,1	50,6
Vi 1	96	45	48	28	21	10
2	52	16	24	12	8	2
Sol P	56,4	50,9	55,3	51,5	50,0	48,9
Vi 1	68	32	16	8	10	4
2	52	0	12	2,4	5	0

(1) P : Porosité totale en % - (2) Vi : vitesse d'infiltration en mm/h.
Période 1,1 début de 1; 1,2 fin de 1; etc...- Vi : 1 sur le billon; 2 sur le sillon

Nota bene : tepetate initial P = 44 % Vi = 0,3 à 0,5 mm/h

2. *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. Donc sans façons culturales le tepetate cultivé devient facilement érodible par les fortes pluies.

SUIVI AGRONOMIQUE et PRODUCTIVITÉ

Les analyses préalables du tepetate au laboratoire et une expérimentation en serre ont montré que ce matériau présente des contraintes responsables de sa stérilité : trop faible macroporosité et conductivité hydraulique, carence en matière organique, azote et phosphore, ainsi qu'en micro-organismes symbiotes de certaines plantes cultivées (maïs, haricot). Mais ils ont aussi des propriétés favorables pour régénérer un sol fertile : 30 à 40 % d'argile qui permet (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 que un pH neutre ou faiblement alcalin, une teneur suffisante en éléments Ca, Mg, K et oligoéléments. C'est pourquoi la réhabilitation d'un sol agricole peut être rapide, rentable et durable, après le rétablissement d'une bonne structure ainsi qu'une fertilisation modérée en N et P (suivant les besoins de la plante) et si possible une fumure organique.

La récupération agricole des tepetates était pratiquée à l'époque préhispanique, mais manuellement, avec des amendements organiques, déjà en terrasses anti-érosives (metepantles). Cependant ce travail après avoir été délaissé est redevenu d'actualité; il est maintenant mécanisé, les cultures et techniques de fertilisation ont changé. Pour évaluer les méthodes, la productivité et l'intérêt économique nous avons fait 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 conclusions majeures en ce qui concerne l'évolution de la productivité en fonction du temps de culture et la rentabilité de cette réhabilitation.

1. Evolution de la productivité.

La fertilité et la productivité augmentent jusqu'à un niveau normal en seulement 3 à 5 années de cultures. 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 faite en première année. En outre des observations ont été faites sur des parcelles remises en culture depuis 2 à 5 années et plus (Navarro et Zebrowski 1992, Marquez et al. 1992).

1. 1. *En première année de culture*, nous avons comparé 4 plantes traditionnelles : blé, maïs, haricot et fève; et en outre la vesce susceptible d'être cultivée comme engrais-vert. Nous avons testé l'effet d'une texture fine ou grossière, d'une fertilisation minérale seule (NP : 0-60/60-60/60-120), ou

accompagné de fumier (40 T/ha). Les résultats majeurs sont les suivants (Tab. 7; fig. 1 à 5).

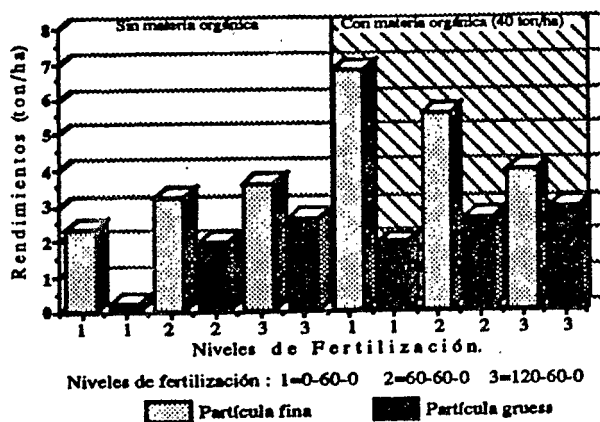


Fig. 1. Influence des traitements sur le rendement du blé (1e année).

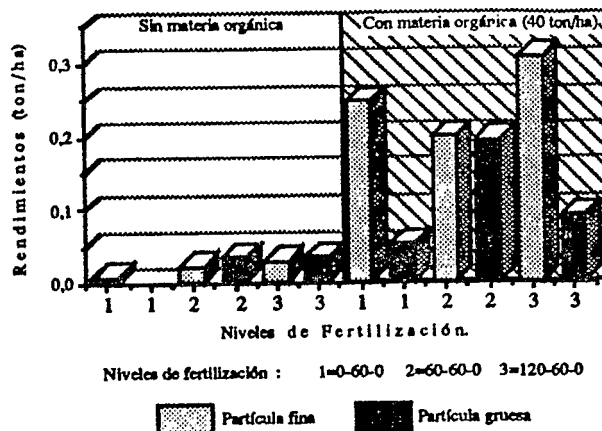


Fig. 2. Influence des traitements sur le rendement du maïs (1e année).

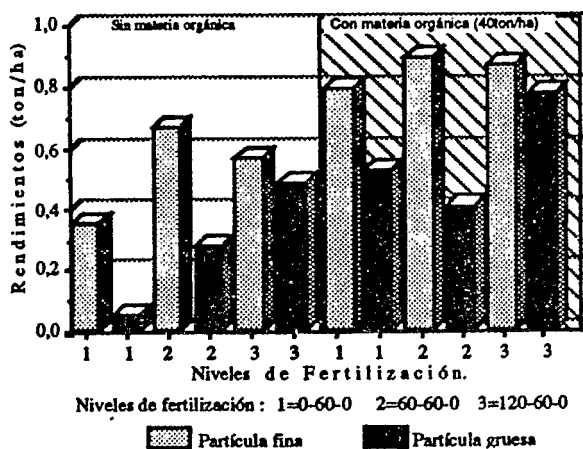


Fig. 3. Influence des traitements sur le rendement de la fève (1e année).

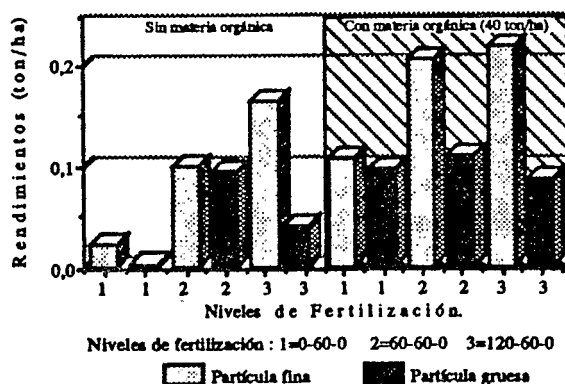


Fig. 4. Influence des traitements sur le rendement du haricot (1e année).

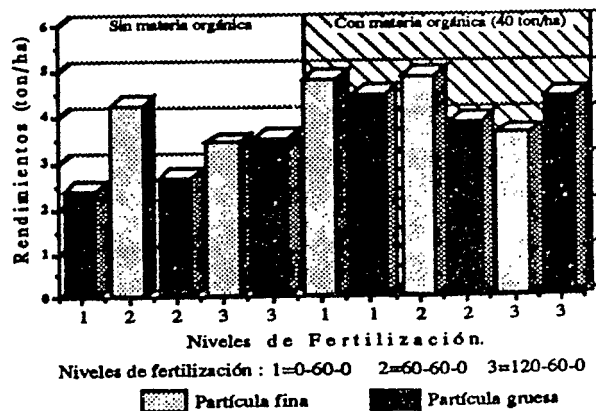


Fig. 5. Influence des traitements sur le rendement de la vesce (1e année).

Tableau 7 - Rendement des cultures sur tepetate (T/ha).

	Maïs	Haricot	Fève	Blé	Vesce
1ère année (1)	0-0,2	0,1-0,2	0,3-0,8	2-4 *	2-4 *
3ème année (1)	2,2-2,5	-	-	1,5	-
5ème 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 autres parcelles 1-2 T/ha (moyenne 1,5).- * : vesce sur parcelles expérimentales, rendement en matière sèche

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 importante. Sans apport de fumier, une terre fine et une fertilisation minérale modérée de N 120 et P 60, permet de produire pour le blé 4 T/ha. La vesce 4 T/ha et la fève 0,4 T/ha. 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 microorganismes symbiotes, nécessaires à la bonne nutrition de la plante (Alvarez-solis et al. 1992; Ferrera 1993 communication orale).

En vue de résoudre le problème de la fertilisation organique des tepetates roturés en 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.

1 2. *De 2 à 5 ans de culture.* En deuxième année sur parcelle expérimentale, sans fumure organique mais fumure minérale (N 120, P80) 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 1,8 T/ ha).

2. Rentabilité de la réhabilitation agricole d'un tepetate

Une enquête sur les "systèmes économiques familiaux" (Zahonero, 1992) a révélé que les tepetates réhabilités en sol sont une ressource en terre agricole importante, voire nécessaire, pour les petites exploitations de moins de 20 ha/ famille. C'est aussi grâce à des aménagements en terrasse, une bonne protection contre l'érosion. La roturation culturale et 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. Ceci permet que le coût* du travail de réhabilitation soit amorti en 8 années normales (* coût assumé par le paysan, compte tenu d'une aide de l'Etat). La rentabilité des investissements financiers sans l'aide de l'Etat 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 permettre d'acquérir le capital nécessaire. De toute manière il faudrait l'aide de l'Etat pour fournir la prestation des travaux à moindre coût.

CONCLUSIONS

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

Les pluies érosives dans les régions de Mexico et de Tlaxcala sont peu nombreuses. Le tepetate "roturé" est assez stable et peu érodible si l'on évite une fragmentation trop fine (< 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 (130 >50 mm/ha). Sans billonnage ni couvert végétal le tepetate cultivé devient rapidement instable et très érodible. La répétition des façons culturales (labours + 2 sarclages et buttage pour le maïs au Mexique) accélère la fonte des agrégats, la formation d'une croûte, le ruissellement et l'érosion. Il faut donc limiter la fragmentation du tepetate et la fréquence du travail du sol. En outre il faut faire des billons cloisonnés afin de réduire les risques d'érosion lors de fortes pluies.

Un tepetate "roturé" et amendé 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 blé et vesce, moins pour la fève; mais non pour le maïs et le haricot, sans doute par carence de microorganismes symbiotes. Cependant le rendement de maïs est normal dès la troisième année et devient optimum en 5 ans. Un amendement organique (fumier ou engrais vert) et l'insémination de symbiotes pourrait accélérer ce processus. L'opération est rentable malgré le coût des travaux, qui peut être amorti en huit ans; mais cela suppose une aide substantielle de l'Etat (travaux à moindre coût, prêt à intérêt réduit), surtout pour les petites exploitations.

REFERENCES

ALVAREZ-SOLIS J. D., FERRERA-CERRATO R. et ZEBROWSKI C., 1992 - Analisis de la microflora asociada al manejo agro-ecologico en la recuperación de tepetates. Terra, vol. 10, Num. esp. : Suelo 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 TS2-A212C, 26 pages + annexes.

CASENAVE A. et VALENTIN C., 1989 - Les états de surfaces de la zone sahélienne; influence sur l'infiltration. ORSTOM, Col. Didactiques, 229p.

CUSTODE E., de NONI G., TRUJILLO G. et VIENNOT M., 1992 - La cangahua en el Ecuador : caractérisación morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión. Terra, vol. 10, Num. esp. : Suelo Volcánicos Endurecidos : 332-346.

JEROME G., 1992 - Etude des réorganisation 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. O. M., juin 1992, 104p + annexes.

LAL R., 1976 - Soil erosion in Alfisols in Western Nigeria. 3 : Effects of rainfall characteristics. Geoderma 16 : 389-401.

MARQUEZ A., ZEBROWSKI C. et NAVARRO H., 1992 - Alternativas agronomicas para la recuperación de tepetates. Terra, Vol. 10, Num. esp. : Suelos Volcánicos Endurecidos : 465-473.

NAVARRO H. et ZEBROWSKI C., 1992 - Etude des sols volcaniques indurés (tepetates) des bassins de Mexico et Tlaxcala (Mexique); leur production agricole. Rapport final CCE TS2-A212C.

PRAT C, OROPEZA J. L. et JANEAU J. L. 1993. - Resultados del primer año de investigación del programa ORSTOM-CP sobre la rehabilitación de los tepetates de Mexico. XIIe Congr. Int. Ciencia del Suelo, Salamanca, 1994; proposition de communication orale, à publier.

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 n° TS2-A212C., 77p.

ROOSE E., 1981. - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Trav. Doc. ORSTOM n° 130; 569p.

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/ISTOM, 120p. + Annexes.