

Habilitation agricole de tufs volcaniques indurés au Mexique. Le cas des "tepetates" de l'altiplano central.

Prat Christian¹, Etchevers Jorge D.²; Báez Aurelio³; Gallardo Juan F.⁴; Padilla Juliana²

¹IRD, Laboratoire Population, Environnement, Développement (LPED), UMR 151, Aix-Marseille Université/IRD, Marseille, France, christian.prat@ird.fr;

² COLPOS, Lab Fertilidad Suelos, Montecillo, Edomex, Mexique, jetchev@colpos.mx, jadic@colpos.mx;

³ INIFAP, Campo exp. Bajío, Celaya, Gto., Mexique, baez.aurelio@inifap.gob.mx

⁴ CSIC, IRNASa, Salamanca, Espagne, juanf.gallardo@csic.es

Résumé

Le long de l'axe transvolcanique mexicain qui traverse le pays d'Est en Ouest, se trouve des sols d'origine volcanique possédant un ou plusieurs horizons indurés, appelés localement « *tepetates* ». Sous l'effet de l'érosion hydrique, ils peuvent affleurer à la surface. Du fait de leur compacité, de leur stérilité biologique et chimique, tout usage agricole est alors impossible. Couvrant près de 31 000 km², ces « sols » constituent un grave problème environnemental, agronomique et social. C'est pourquoi, au cours des dernières décennies, ont été menés de nombreux travaux pluridisciplinaires de recherche, associant notamment des équipes mexicaines à des équipes européennes. Les résultats ont montré que les *tepetates* étaient des tufs volcaniques datant de 10 à 40 000 ans, argilo-limoneux, compacts, pratiquement imperméables, dépourvus des principaux éléments nutritifs, et affleurant généralement au niveau des ruptures de pente des piedmonts. De par leur nature géologique, les *tepetates* peuvent être défonçés et mis en culture, sans risque de voir se reformer cette induration. Il est possible d'obtenir un nouveau sol très productif dès la première année et un véritable sol vivant, en l'espace de 3 à 5 ans. Ainsi le défonçage au bulldozer à 30-40 cm de profondeur doit être croisé, suivi d'un passage croisé de disques passés au tracteur à faible vitesse. Un apport d'engrais minéraux est indispensable lors des premiers semis, de préférence associés à celui de fumier (12 t.MS/ha). Ensuite, il faut gérer les résidus de culture, effectuer des rotations avec des légumineuses. Quelques cultures, comme le maïs et le haricot, ne sont toutefois productives que 2-3 ans après la formation du nouveau sol. Ces apports de matières organiques sont essentiels pour le sol, les cultures et l'environnement. En effet, en capturant près de 90 t de C/ha sur les 20 premiers centimètres du sol, on lutte contre le réchauffement climatique. Au vu des quantités de C séquestré, l'incorporation des *tepetates* à des pratiques culturales adéquates, pourraient être une source de financement international.

Mots-clés : Mexique, sols volcaniques indurés, *tepetate*, agronomie, fertilité, carbone, agriculture pluviale, habilitation agricole.

Abstract

Along the mexican transvolcanic belt that crosses the country from east to west, there are soils of volcanic origin with one or more hardened horizons, locally called *tepetates*. Under the effect of water erosion, *tepetates* appear on the surface. Due to their compactness, biological and chemical sterility, any agricultural use is practically impossible under its natural conditions. Covering nearly 31,000 km², these "soils" are a serious environmental, agricultural and social problem. That is why, in recent decades, many multidisciplinary researches have been conducted by Mexican and European teams. Results showed that *tepetates* are volcanic tuff that emerged 10,000 to 40,000 years ago - silty clay, compact, waterproof, virtually devoid of carbon, nitrogen and phosphorus, and generally appearing at slope foothills ruptures. Due to their geological origin, *tepetates* can be broken and cultivated without risk of seeing hardening again. It is possible to obtain a new highly productive substrate ("soil") since the first year and almost a regular "soil", in 3 to 5 years. To achieve this status, *tepetates* must be ripped by a bulldozer at 30-40 cm depth, followed by a cross passage with discs done by a tractor at low speed. An input of mineral fertilizers is essential during the first sowing year, preferably associated with manure (12 t. DM/ha). Then crop residues must be managed and rotations with legumes performed. Some crops, such as corn and beans, however, are not as productive til 2-3 years after the formation of the new "soil". These inputs of organic matter are essential for the new "soil" being formed, crops, and environment. Indeed, capturing nearly 90 t C /ha in the first 20 cm depth, means fighting against global warming. Due to the quantities of C captured, the creation of a soil from *tepetates*, managed according to good agricultural practices can be a source of international funding.

Keywords : Mexico, indurated volcanic soils, *tepetate*, agronomy, fertility, carbon, rainfed, agricultural empowerment.

Problématique.

L'axe transvolcanique mexicain qui traverse d'est en ouest le centre du pays, est constitué de chaînes de volcans encadrant des vallées. Les sols y sont donc d'origine volcanique. Le climat tempéré sub-humide à humide (600 à 1100 mm an⁻¹) présente une saison sèche marquée d'octobre à mai. Au niveau des piedmonts, les sols possèdent un ou plusieurs horizons indurés plus ou moins proches de la surface. Ces matériaux indurés sont appelés localement *tepetates*, qui est un terme nahuatl qui signifie « lit de pierres » (Simeon, 1887). Ils ont des propriétés de fragipan (dur à l'état sec, friable à l'état humide), et sont classés comme des Regosols (Eutric Regosols, FAO; Lithic Ustorthents, USDA). L'origine de ces matériaux est liée au volcanisme éruptif de type phréato-magmatique qui se traduit par l'émission de coulées de boue (*lahar, surge*) capables de recouvrir des surfaces de plusieurs dizaines, voire même de milliers de kilomètres carrés (Cas & Wright, 1988). Ces dépôts peuvent être ou non remaniés puis recouverts de cendres éoliennes qui à la longue, vont former un sol très fertile contrairement aux coulées qui elles, vont se consolider et s'indurer. Ces processus éruptifs peuvent se répéter en l'espace de quelques heures, de mois, d'années ou de milliers d'années. Le résultat est une succession de dépôts de tufs indurés et de cendres non consolidées, plus ou moins altérées, formant parfois un paléosol. Dans le cas de la Sierra Nevada située entre Mexico et Puebla, Werner *et al.* (1978) ont pu établir que la dizaine de séries décrites datent de -40 000 ans pour la plus ancienne à -10 000 ans pour la plus récente.

L'étude approfondie de l'origine et de la nature de l'induration de ces tufs, montre quelle est due principalement à des processus géologiques auxquels peuvent se rajouter parfois des dynamiques pédologiques (Hidalgo *et al.*, 1992; Etchevers *et al.*, 2004; Sedov *et al.*, 2003). Ainsi, la présence de carbonates de certains niveaux est attribuée à un climat plus chaud et humide il y a 8 à 10 000 ans, qui a permis leur dissolution, transport et recristallisation (Quantin, 1992). Il reste que l'induration n'ayant pas de causes actuelles, il n'y a donc pas de risque qu'elle réapparaisse après le défonçage de ces horizons.

Sous l'effet des pluies et de la mauvaise gestion des terres par l'Homme, les sols couvrant les *tepetates* peuvent être érodés et même disparaître au point de laisser affleurer ces matériaux indurés. Les surfaces concernées sont considérables puisqu'elles couvriraient au moins 30 700 km² au Mexique (Zebrowski, 1992). Pour certains états comme celui de Tlaxcala (Werner *et al.*, 1988), c'est même près de la moitié de leur superficie qui est érodée! Or ces horizons indurés, de par leur genèse, sont pratiquement stériles tant sur le plan physique que chimique et biologique (Etchevers *et al.*, 1998). De plus, leur compacité bloque la circulation des gaz et de l'eau. Il est donc impossible de les cultiver en l'état. Les conséquences socio-économiques sont d'autant plus importantes que ces affleurements sont localisés sur les piedmonts des reliefs (Servenay & Prat, 2003) qui correspondent aux zones cultivées par les petits paysans plus ou moins marginalisés (Prat *et al.*, 1997; Zapata Martelo *et al.*, 2006). D'autre part, les secteurs situés en aval de ces terrains quasi imperméables, souffrent d'inondations récurrentes lors d'évènements pluvieux importants (Bouvier *et al.*, 1995).

Au delà d'un usage dans la construction sous forme de blocs, les *tepetates* ont d'abord et avant tout, fait l'objet d'aménagement en vue de leur donner un usage agricole et ce, dès l'époque précolombienne, preuve que la mauvaise gestion des sols n'est pas une affaire récente (Werner *et al.*, 1988 ; Navarro & Prat, 1996)! Pour créer un sol nouveau à partir de ces matériaux durs, il faut d'abord rompre les blocs. Dans les premiers temps, cela fut fait à la main à l'aide de pics, puis à partir des années 1960, avec des tracteurs puis des bulldozers. Le travail de défonçage devint alors plus rapide, plus profond mais

aussi bien plus érosif qu'autrefois quand le travail est fait sans précaution. Après une courte période d'assouplissement, les programmes de mise en culture des *tepetates*, cofinancés par les gouvernements locaux, ont repris à partir des années 2010. Ils s'appuient sur les résultats de recherches menés au cours de ces trente dernières années, notamment ceux réalisés dans le cadre de coopérations euro-mexicaines (Etude des sols volcaniques indurés de Mexico et de Tlaxcala en vue de leur réhabilitation agricole, 1988-1992. Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine, 1992-1996. REVOLSO-Alternative agriculture for a sustainable rehabilitation of deteriorated volcanic soils in Mexico and Chile, 2001-2006). Ces travaux, au delà de la compréhension des origines et caractéristiques des *tepetates*, ont permis de définir les conditions nécessaires à la conversion de ces matériaux indurés stériles en sols fertiles et productifs dans le cadre d'une approche durable, compatible avec les intérêts et les capacités techniques et économiques des petits paysans concernés tant au Mexique que dans d'autres pays latino-américains (Prat *et al.*, 2012).

2. Les *tepetates*, des matériaux inertes, compacts et stériles.

Les *tepetates* de par leur origine phréatomagmatique et leur mode de dépôt, présentent des propriétés bio-physico-chimiques ayant de nombreux traits communs, même si on peut noter une certaine variabilité pour chacune d'entre elle. Il n'y a donc pas un *tepetate*, mais des *tepetates*, chacun ayant des caractéristiques propres sur un fond commun. La première caractéristique commune est naturellement la compacité et la dureté qui peuvent être extrêmement élevées dans le cas de *tepetates* carbonatés (Tab.1). La force de pénétration en sec est de l'ordre de 20 kg.cm^{-2} . La porosité est faible, et ce d'autant plus, qu'elle est constituée principalement de bulles occluses (Hidalgo *et al.*, 1992) et que la macro porosité est inférieure à 5%. Il n'est donc pas surprenant que la conductivité hydraulique ne dépasse pas quelques millimètres par heure (Prat *et al.*, 2003). Cette compacité constitue donc la principale limitation physique. Le premier enjeu de la mise en culture des *tepetates* est donc la création d'une porosité qui fait défaut au matériau initial afin de permettre à l'eau, aux gaz et aux racines de circuler facilement et de permettre les interactions et les échanges indispensables à la vie d'un sol.

Tableau 1: Valeurs minima, moyennes et maxima des caractéristiques physiques des *tepetates* (Penã & Zebrowski, 1992).

	Argile %	Limon %	Sable %	Densité réelle	Densité apparente	Porosité totale %
Valeurs min.	25,1	12,8	21,7	2,3	1,2	32
Valeurs moy.	35,6	21,2	43,2	2,4	1,5	50
Valeurs max.	42,0	41,8	60,4	3,0	1,6	64

En ce qui concerne les propriétés liées à la fertilité minérale et organique (Tab. 2), on observe un pH eau alcalin, une teneur en C, N et P pratiquement nulle, mais une forte CEC liée à la présence d'argile de type 2:1 et un pourcentage de saturation en bases élevé. La fertilité des *tepetates* est donc extrêmement limitée (Etchevers *et al.*, 1998). C'est le second enjeu de la conversion de ces matériaux en sol.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des *tepetates*, (Sources: Peña & Zebrowski, 1992; Etchevers *et al.* 1992a).

	pH	pH	C	N	P	CEC	Bases échangeables				S/T	FeO ₂ Libre
	eau	KCl					total	assim	Ca	Mg		
			%	%	ppm		mg/100 gr de sol ----				%	%
Tepetate	7,3- 8,0	6,3- 7,0	0,08- 0,15	0,01- 0,02	3≤	17- 25	6,7- 15	4,5- 7	0,4- 1	0,6- 2	58-80	1
Tepetate carbonaté	8,9	7,4	0,36	0,07	3≤	41	45,3	11,9	3,9	3,4	100	3

Enfin, la vie dans les *tepetates* est également très pauvre, tant en nombre d'espèces qu'en population. Ferrera-Cerrato (1992) a ainsi dénombré 2.2×10^4 de bactéries, 1.2×10^4 d'actinomycètes et 0.7×10^2 de champignons par cm^3 de sol. C'est le troisième enjeu de la récupération des *tepetates*: permettre le développement de micro-organismes, aussi diversifiés que nombreux.

3. Le défonçage mécanique des *tepetates* ou comment passer d'une structure massive à une structure fragmentée et poreuse.

Le défonçage mécanique se fait avec un bulldozer, type D6 ou D7 de Caterpillar, équipé de 3 dents espacées de 50 cm. Le plus efficace est d'effectuer un passage croisé à une profondeur effective de 30-40 cm. Il faut compter 1 à 2 jours de travail par hectare. Dans la mesure où il s'agit de terrains localisés sur des piedmonts, il est indispensable d'effectuer également des travaux de terrassements (terrasse, talus, évacuation des eaux, contrôle des chemins d'accès) visant à réduire l'érosion hydrique et à faciliter le travail du paysan. Afin de stabiliser les bords, il faut planter des espèces pérennes, telles que figuiers de barbarie, agaves, arbres fruitiers. De plus, ces plantes fourniront des produits commercialisables au bout de quelques années.

Après le passage du bulldozer qui globalement crée des blocs de plusieurs dizaines de centimètres cubes, il faut ensuite faire un passage croisé de disques avec un tracteur afin de réduire cette taille d'un facteur 10 à 100. Il est à noter que paradoxalement, un défonçage plus profond permettant de créer une réserve hydrique plus élevée, entraîne des surcoûts et un trop grand émiettement des fragments à cause des plus nombreux passages du bulldozer. Il en va de même, en cas de trop nombreux passages de disques, ou bien de passage à une vitesse trop élevée afin de ne pas transformer les blocs en particules de la taille de limons (Tab. 3.). Or cette granulométrie, sous l'effet des premières pluies, favorise la formation d'une croûte de battance de plusieurs centimètres d'épaisseur, rendant la surface du sol imperméable. L'eau ne pouvant plus pénétrer le sol, génère une érosion en nappe très importante et réduit d'autant l'infiltration et donc la recharge de la nouvelle réserve hydrique (Lauffer *et al.*, 1997; Quantin *et al.*, 1998) avec pour conséquence, la baisse de rendement de la culture installée (Prat *et al.*, 1997).

Le respect des recommandations énoncées conduit à un accroissement de la porosité des *tepetates* ce qui augmente la capacité de captation de l'eau de 5 à 6 fois par rapport à celle de *tepetates* à l'état naturel. Le ruissellement diminuant d'autant, les pertes de sols liées à l'érosion en nappe ainsi que les risques d'inondation en aval sont alors fortement réduits (Prat *et al.*, 2003).

Tab. 3. Granulométrie du *tepetate* en fonction de son mode de préparation initiale et après 3 ans de mise en culture.

	Argile 2µm	Limon 2-50 µm	Sable fin 50-200µm	Sable grossier 200-2000µm
	----- /g 100g ⁻¹ -----			
Référence	24	37	21	15
Travail profond (50 cm)	26	43	18	11
Passage trop rapide de disque	30	36	19	12
Apport de fumier (50 t ha ⁻¹) et travail à 40cm de profondeur	25	33	17	22

Tableau 4 : Caractéristiques physiques d'un *tepetate* avant et après défonçage, San Miguel Tlaixpan, Edomex (Prat *et al.*, 2003).

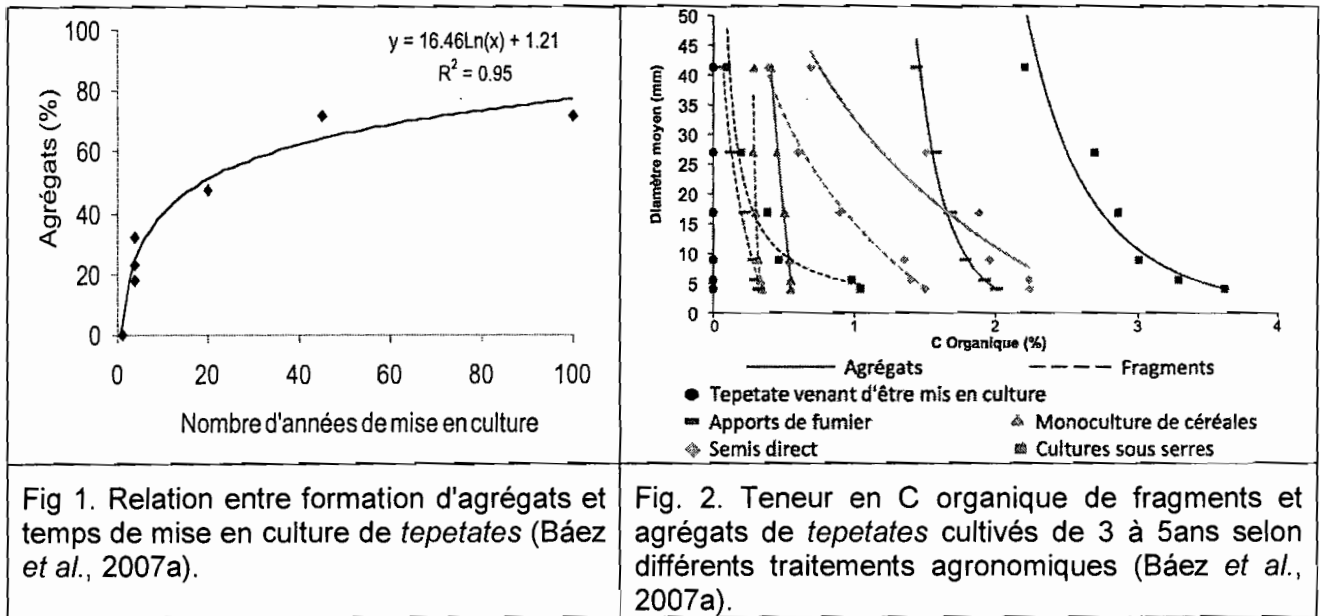
Caractéristiques physico-hydriques	Avant défonçage	Après défonçage
Dureté	Friable humide Dur en sec	Meuble
Densité apparente	1,45	1,10
Porosité totale	≤ 45%	55%
Point de flétrissement permanent	22%	19%
Capacité au champ	32%	32%
Saturation	41%	48%
Vitesse infiltration (double anneau)	3 mm h ⁻¹	15-20 mm h ⁻¹

4. La gestion de la matière organique des *tepetates*, ou, comment passer d'un substrat minéral fragmenté à un sol grumeleux.

Le travail mécanique des *tepetates* permet de passer de blocs à des fragments aux bords anguleux plus petits. Toutefois, il ne s'agit pas encore d'agrégats. Or ce sont les agrégats, association de fragments minéraux et de matières organiques, qui constituent une des bases de la fertilité des sols.

Báez *et al.* (2007a) ont sélectionné une centaine de parcelles de *tepetates* cultivés en fonction de leur date de mise en culture (0 à 100 ans) et des pratiques culturales. Une séparation visuelle entre agrégats et fragments a été faite sur des échantillons prélevés entre 0-20 cm de profondeur. Un tamisage a permis de sélectionner 5 classes granulométriques (50,3-22,2/22,1-11,3/11,2-6,30/6,29-4,25/4,24-3,36 mm) sur lesquelles ont été mesurées le C organique. Il ressort que le pourcentage d'agrégats augmente d'une part avec le temps de mise en culture des *tepetates* (Fig. 1) et d'autre part avec le type de pratique culturale qui incorpore le plus de matières organiques (Fig. 2).

Que ce soit en plantations expérimentales d'arbres fruitiers, de cultures fourragères (Velázquez *et al.*, 2001) ou vivrières de plein champs (Báez *et al.*, 2002, Covaleda *et al.*, 2011) l'accumulation de C dans un *tepetate* récemment cultivé est immédiate et n'atteint une limite qu'au bout d'une vingtaine d'années. La quantité de carbone organique stocké dans les 20 premiers centimètres du sol peut atteindre des valeurs considérables en 3 à 5 ans, puisque Báez *et al.* (2002) a mesuré 90 Mg.ha⁻¹ de C. Sachant que l'on part pratiquement d'une teneur en C proche de 0, on voit l'intérêt de la mise en culture des *tepetates* dans le cadre du réchauffement climatique et de la séquestration du carbone.



5. La gestion de la fertilité des tepetates, ou, comment passer d'un substrat minéral stérile à un sol fertile chimiquement.

Comme il vient d'être précédemment mentionné, les tepetates sont pratiquement dépourvus en matières organiques, mais aussi d'azote (N), ce qui est normal puisqu'il s'agit de matériaux géologiques, compacts et abiotiques, et non de sol. Il n'y a donc pas d'autres alternatives que d'effectuer des apports sous forme d'engrais minéraux dans un premier temps au moins. Même dans le cas d'apport massif de fumier et de compost, la minéralisation d'engrais organiques prenant du temps et leurs teneurs en éléments fertilisants étant faibles, il est indispensable, tout du moins les premières années de mise en culture, d'ajouter un apport minéral complémentaire au début du cycle agricole afin d'aider le démarrage des cultures (Báez et al., 2007b). Il faut noter que les apports de résidus de culture restent insuffisants, au moins en ce qui concerne N, pour couvrir les besoins des cultures suivantes. Ainsi, les résidus de culture de maïs issus de différents modes de pratiques agronomiques en milieu non irrigué, génèrent entre 8 et 27 kg/ha N alors que les besoins de cette même culture selon ces mêmes pratiques, varient entre 33 et 84 kg/ha (Pérez-Olvera et al., 2000).

Les doses optimales (40 t.MS/ha/an) de fumier pour améliorer la structure du sol (via formation d'agrégats) et la fertilité (via N), sont incompatibles avec la réalité pratique, technique et économique des petits paysans mexicains. Il est donc plus réaliste de viser des apports réduits (12 t.MS/ha/an) de fumier/compost mis aux pieds des plantes associés à des engrais verts (*Medicago polymorpha*, Vesce...) et aux résidus de cultures, afin d'en enfouir la plus grande quantité possible. L'augmentation des teneurs en C dans les sols est immédiate et atteint en quelques années des valeurs significatives si ces recommandations sont suivies (Navarro, 1998, Báez et al., 2002, Covalada et al., 2009).

Les teneurs en phosphore total (130 mg P.kg⁻¹) des tepetates non cultivés sont très largement inférieures à celles que l'on trouve normalement dans les sols cultivés (450 à 1100 mg P.kg⁻¹ selon Havlin et al., 2004). Quant au P organique et assimilable, ils sont présents à l'état de traces (Etchevers et al., 1992b; Covalada et al., 2009). Ces très faibles teneurs s'expliquent par le nombre réduit de minéraux contenant des phosphates dans les tepetates. Une gestion des apports et des pratiques culturales adéquates permettent d'obtenir une évolution rapide des teneurs en phosphore du nouveau sol créé. Ainsi, l'application de fertilisants minéraux phosphatés (superphosphate triple, 100 unités.ha⁻¹, 3 applications sous forme de granulés) a un effet positif immédiat sur le P assimilable.

L'apport de résidus organiques (culture, fumier) améliore la disponibilité de cet élément sous sa forme assimilable (Alvarez et al, 2000; Báez et al, 2002). En l'espace de 20 ans, on observe ainsi une progression linéaire de la teneur en P assimilable où, en valeurs moyennes, on passe de pratiquement 0 à 4,5 mg P.kg⁻¹. D'autre part, les *tepetates* présentent une capacité à adsorber rapidement le P appliqué. Ainsi en 24h, il peut en fixer 60% dans le cas des *tepetates* non cultivés, et 56% dans le cas de *tepetates* cultivés depuis 5 ans. Ces taux indiquent aussi qu'une partie importante du P n'est pas immédiatement utilisé par les plantes l'année de l'application de ces apports, mais qu'il reste toutefois sous une forme disponible pour être utilisé par les cultures l'année suivante. En conséquence, afin de remédier à ce déficit nutritif, il est recommandé de réaliser des applications annuelles de phosphates comprises entre 40 et 80 kg.P.ha⁻¹ en fonction de l'âge de mise en culture des *tepetates* concernés, des pratiques agronomiques menées et de la culture prévue (Etchevers et al., 1992b).

Contrairement au P et à N, les *tepetates* sont bien pourvus en potassium (K) (Tab.1). En effet, ce K est principalement issu de la dégradation de minéraux potassiques qui les composent (Hidalgo et al., 1992). La capacité tampon mesurée par Etchevers et al. (1992a), indique qu'une grande partie du K échangeable peut être extrait et devenir soluble ce qui explique sa disponibilité et sa teneur. Les concentrations en K soluble dans l'eau dans les *tepetates* travaillés est d'environ 0,35 meq.100 gr⁻¹ de sol alors que celle des *tepetates* non cultivés depuis plusieurs années est supérieure (0,50 meq.100 gr⁻¹ de sol) à cette valeur. Il en va de même avec les teneurs en K assimilable pour des *tepetates* cultivés depuis 30 ans (0,90 meq.100 gr⁻¹ de sol), par rapport à celle des *tepetates* non cultivés (1,20 à 1,63 meq.100 gr⁻¹ de sol). Ces différences s'expliquent par les faibles, voire même l'absence totale d'apports de fertilisants potassiques par les paysans puisque dans les systèmes traditionnels, les demandes des cultures en K ne dépassent jamais le K disponible dans les sols (Havlin et al., 2004). Toutefois, la baisse de teneur indique qu'il faut compenser les pertes par un faible apport de K (Etchevers et al., 1992b).

Etchevers et al., (1998) ont montré que les *tepetates* apportent les autres éléments minéraux dont les plantes ont besoin pour leur développement. Covalada et al. (2009) ont mesuré sur parcelles récemment défoncées et cultivées ainsi que sur des parcelles cultivées depuis 20 ans, que les teneurs en Ca²⁺ restaient constantes et que celles en Mg²⁺ et Na⁺ échangeables étaient divisées par deux en passant respectivement de 12 à 6 cmol.kg⁻¹ et de 1,4 à 0,7 cmol.kg⁻¹. La saturation en bases diminue donc au bout de quelques années, de 100% à 90%. Ceci se traduit par une baisse du pH d'une unité: on passe de 7,5 à 6,5 en 20 ans (Baumann et Werner, 1997).

6. La gestion de la vie dans les *tepetates*, ou, comment passer d'un substrat minéral abiotique à un sol vivant.

Contrairement aux *tepetates* à l'état naturel, les sols sont des ensembles vivants. La mise en culture des *tepetates* et le développement de la vie, en particulier micro-biologique, dans ces nouveaux sols, constituent le troisième enjeu.

Les bactéries, actinomycètes et champignons sont présents dans les *tepetates* au niveau des fentes et des quelques racines des rares plantes qui poussent de façon sporadique sur ces matériaux. Leur nombre et variété sont dans ces conditions très limités (Tabl. 5). Toutefois, le simple fait de fracturer les *tepetates* fait doubler les populations, et deux mois plus tard, les valeurs initiales sont triplées. C'est toutefois l'apport de matières organiques sous formes de compost qui conduit réellement à l'explosion de ces populations, les amenant à des valeurs proches de celles du sol en place recouvrant le *tepetate* étudié (Álvarez-Solís et al., 1992).

Tab. 5. Evolution des populations de bactéries, actinomycètes et champignons dans un *tepetate* non cultivé et cultivé selon différents traitements, et d'un sol de référence Álvarez-Solis *et al.*, 1992).

	Bactéries	Actinomycètes	Champignons
Avant défonçage	$2,2 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	$0,007 \times 10^4$
Après défonçage	$6,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$	$0,013 \times 10^4$
+ 2 mois + pluies	$9,9 \times 10^4$	$3,5 \times 10^4$	$0,017 \times 10^4$
+ compost	250×10^4	$14,0 \times 10^4$	$0,065 \times 10^4$
Sol référence (Phaeozem)	4600×10^4	$21,0 \times 10^4$	$0,400 \times 10^4$

L'importance des microorganismes réside dans leur activité métabolique qui permet de fixer le N et de le minéraliser durant la transformation des matières organiques en humus stable. Dans la mesure où durant les premières années de mise en culture des *tepetates*, la quantité de matières organiques est faible, il existe une compétition entre micro-organismes et cultures pour utiliser le peu de N disponible qui se fait au détriment des plantes (Ferrera-Cerrato *et al.*, 1997). Cette faim de N est également une des raisons qui explique la recommandation d'apporter en début de culture, du N minéral afin d'éviter cette compétition. D'autre part, les racines, les exudats (Velázquez *et al.*, 2001), et les champignons mycorhiziens produisent notamment de la glomaline (Báez *et al.*, 2010). Or, sur les $90 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de C des premiers 20 cm du sol, $13,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ c'est à dire 15% du C provient de la glomaline. De plus, cette glycoprotéine en agissant comme une colle entre les particules, augmente considérablement le nombre d'agrégats du sol (Báez *et al.*, 2010). C'est dire l'importance des micro-organismes dans la séquestration du C. Enfin, la culture du maïs au cours de la première année de mise en culture des *tepetates*, ne produit pas de grains alors que la production de matière verte est relativement bonne. Bien qu'il n'y ait pas d'études sur le sujet, il est probable que c'est l'absence de microorganismes inféodés au maïs qui est responsable de cette situation.



Champs sur tepetate réhabilité, un mois après semis d'orge + vesce (photo Prat)

7. Les *tepetates* cultivés: de nouveaux sols productifs mais qui ont un coût.

Les enquêtes de terrains auprès de petits paysans et les expérimentations à différentes échelles (depuis le laboratoire au plein champ) menées depuis plus de 20 ans, ont permis d'aboutir à l'élaboration de recommandations agronomiques pour les petits paysans en agriculture pluviale, recommandations qui permettent d'obtenir de très bons rendements dès la première année de mise en culture.

Comme il a déjà été signalé, le maïs et les haricots sont à proscrire en début de mise en culture des *tepetates*. Les céréales à petits grains (blé, orge..), associées à une légumineuse (vesce, luzerne type *Medicago polymorfa*), avec une fertilisation minérale 80-60-0 dont l'apport sera fractionné en trois, est une des meilleures alternatives puisque l'on a pu obtenir 18 t.MS.ha⁻¹ de fourrage frais et plus de 3,0 t.MS.ha⁻¹ d'orge, sans irrigation, soit 20% de mieux que les rendements régionaux moyens! En seconde année de culture, le maïs en monoculture, ne dépassent pas les 2,0 t.MS.ha⁻¹ (ce qui correspond à la moyenne régionale) alors que l'association traditionnelle maïs-fève-haricot, donne des rendements en maïs de 2,2 t.MS.ha⁻¹ auquel il faut ajouter ceux des fèves (excellents) et des haricots (moyens)! Les années suivantes les rendements continuent d'augmenter (+10% en 3^{ème} année) pour atteindre 3,5 t.MS.ha⁻¹ de maïs avec une fertilisation plus importante de 120-60-0 (Navarro, 1998). Il faut noter que les résultats sont toujours meilleurs dans le cas des parcelles ayant reçu ou recevant régulièrement des composts et/ou les résidus de culture sont de plus réincorporés dans le nouveau sol (Báez *et al.*, 2007b).

En 2013, le défonçage des *tepetates* au bulldozer (Caterpillar D6, 3 dents) effectué selon nos recommandations coûte environ 650 € ha⁻¹ pour 1 à 2 jours de travail. Les passages d'un tracteur ensuite reviennent à 80 € ha⁻¹ pour 4h de travail. Le coût total dépasse donc les 700 € ha⁻¹. Si ce travail était effectué à la main, c'est-à-dire avec des pioches, le coût serait beaucoup plus élevé puisqu'il atteindrait pratiquement le double mais donnerait du travail à des dizaines de personnes. Or, dans ces milieux marginalisés, avoir un emploi, même temporaire et pénible, représente une aide financière importante pour les populations locales. Dans ces zones où c'est l'agriculture pluviale qui prédomine, la production ne dépasse pas les 2 à 3 t ha⁻¹ de maïs, d'orge ou de blé. Début 2013, cela revient à obtenir entre 450 à 700 € ha⁻¹ pour le maïs, de 500 à 750 € ha⁻¹ pour le blé et 350 à 550 € ha⁻¹ environ pour l'orge. A ces sommes, il faut encore soustraire les coûts de la culture elle-même. Si l'on compare les bénéfices de ces cultures aux coûts de préparation des *tepetates*, on voit qu'il faut attendre pratiquement 10 ans de retour sur investissements. Même avec des cultures à très fortes valeurs ajoutées comme les arbres fruitiers et les fleurs, il faut attendre au moins 5 ans. Ces sommes et l'immobilisation de capital, sont incompatibles avec les ressources dont peuvent disposer les petits paysans mexicains de ces régions. Ainsi, dans tous les cas, une aide extérieure est indispensable si l'on veut convertir ces matériaux en champs agricoles productifs.

8. Conclusion

En conclusion, il est donc possible de transformer les *tepetates*, tufs volcaniques compacts, stériles en un sol nouveau, fertile, vivant et très productif. Il faut pour cela d'abord apporter des engrais minéraux, puis augmenter et gérer les matières organiques dont l'impact sur la physique, la chimie et la biologie du sol est considérable. Même si les coûts des travaux de mise en culture et terrassement peuvent être récupérés au bout d'une décennie, l'investissement initial est hors de portée du petit paysan mexicain concerné. Seule une aide de l'Etat, sous forme de prêt d'engins de terrassement par exemple, peut permettre la réalisation effective de ces travaux. La capacité de ces nouveaux sols à adsorber d'énormes quantités de C en très peu de temps, devrait permettre d'obtenir des financements dans le cadre de la capture du C afin de lutter contre le réchauffement climatique, lesquels financements devraient être utilisés pour payer les engins permettant de transformer les *tepetates* en sol.

8. Bibliographie

- Alvarez-Solis, J. D., R. Ferrera-Cerrato, C. Zebrowski, 1992. Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de los tepetates. *In: Zebrowski et al. (Eds). 1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra 10 N° esp.: 419-424.*
- Álvarez D., J., R. Ferrera C., J. D. Etchevers Barra, 2000. Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*, 34 : 523-532.
- Báez Pérez, A., J. D. Etchevers Barra, C. Prat, A. Márquez Ramos, E. Ascencio Zapata, 2007b. Manejo agronómico de los tepetates del eje neovolcánico de México. *In: Gallardo L., J. F. (Ed.), Captura de carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos.* Red POCAIBA y Red IFQA, Salamanca, España, pp. 69-84.
- Báez Pérez, A., J. D. Etchevers Barra, C. Prat, C. Hidalgo Moreno, 2007a. Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Río Texcoco basin, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 3 : 487-497.
- Báez Pérez, A., J. D. Etchevers Barra, C. Hidalgo Moreno, C. Prat, V. Ordaz Chaparro, R. Núñez Escobar, 2002. Organic C and Olsen-P in cultivated tepetates of Mexico. *Agrociencia*, 36, 6 : 643-653.
- Báez Pérez, A., M. C. Á. González Chávez, J. D. Etchevers Barra, C. Prat, C. Hidalgo Moreno, 2010. Glomalin and carbon sequestration in cultivated tepetates. *Agrociencia*, 44, 5 : 517-539.
- Baumann, J., G. Werner, 1997. Nutrient supply of reclaimed indurated volcanic ash soils and evaluation of productivity with the QUEFTS-Model. *In: Zebrowski et al. (Eds). 3º Symp. intern. suelos volc. endurecidos, 12/1996, ORSTOM-UE-PUCE-UCE, Quito, Ecuador. p. 194-201.*
- Bouvier C., F. Rossel, 1995. Modélisation des crues sur le bassin de Chalco-San Marcos (110 Km²) : résultats et applications. *In: Le Barbé L., Servat E. (Eds.), Régionalisation en hydrologie: application au développement. 8^{ème} Journées Hydro. ORSTOM, 1992/09/22-23, Paris, France. p. 253-267.*
- Cas, R. A., J. V. Wright, 1988. Volcanic successions. Modern and ancient. A geological approach to processes, products and successions. Unwin Hyman Inc., London, GB, 528 pp.
- Covalada, S., S. Pajares, J. F. Gallardo, J. Padilla, A. Baez, J. D. Etchevers, 2009. Effect of different agricultural management systems on chemical fertility in cultivated tepetates of the mexican transvolcanic belt. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 129: 422-427.
- Covalada, S., J. F. Gallardo, F. García-Oliva, H. Kirchmann, C. Prat, M. Bravo, J. D. Etchevers, 2011. Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico). *Soil Use and Management* 27, 2 : 186-194.
- Etchevers Barra, J. D., R. López, C. Zebrowski, D. Peña, 1992a. Características químicas de tepetates de referencias de los estados de México y de Tlaxcala, México. *In: 1e Simp. inter. suelos volc. endurecidos (Ed.: Zebrowski et al.), Mexico, Mexique, 10/1991, Terra, num. esp. N°10, 171-177.*
- Etchevers Barra, J. D., C. Zebrowski, C. Hidalgo Moreno, P. Quantin, 1992b. Fertilidad de los tepetates II. Situación del fósforo y del potasio en tepetates de México y Tlaxcala. *In: Zebrowski et al. (Eds). 1º Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra, num. esp. N°10 : 385-391.*
- Etchevers Barra, J. D., M. A. Pérez Olivera, H. Brito V., M. Vargas I., U. López N., 1998. La fertilidad de los tepetates del eje neovolcánico en los estados de México y Tlaxcala. *In: Navarro Garza et al. (Eds), Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates).* ORSTOM-CP, Mexico, pp. 17-36.
- Etchevers Barra, J. D., C. Hidalgo Moreno, C. Prat, P. Quantin, 2004. Tepetates of Mexico. *In: Lal, R. (Editor), Encyclopedia of soil science.* Marcel Dekker, Inc, New York, USA : 1745-1748.
- Ferrera-Cerrato, R., 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginados. *In: Zebrowski et al. (Eds). 1º Simp. inter. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra, num. esp. N°10, 408-418.*
- Ferrera-Cerrato, R., A. Ortiz C., J. Delgadillo M., S. Santamaría R., 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. *In: Zebrowski et al. (Eds). 3º Simp. inter. suelos volc. endurecidos, 12/1996, ORSTOM-UE-PUCE-UCE, Ecuador. pp. 225-237.*
- Havlin, J. L., S. L. Tisdale, W. L. Nelson, J. D. Beaton, 2004. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 7th Edition. Prentice Hall, USA, 528 p.
- Hidalgo M., C., P. Quantin, C. Zebrowski, 1992. La cementación de los tepetates: estudio de la silicificación. *In: Zebrowski et al. (Eds). 1º Simp. inter. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991, Terra, num esp. N°10 : 192-201.*
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat, J.-L. Janeau, 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados (Texcoco, México). *In: Zebrowski et al. (Eds). 3º symposium internacional suelos volcánicos endurecidos, ORSTOM-UE-PUCE-UCE, 12/1996, Quito, Ecuador : 443-456.*

- Navarro Garza, H., Prat, C.** 1996. Habilitación agrícola de los tepetates (suelos volcánicos endurecidos y estériles) de los valles de México y de Tlaxcala. In: Bovin, P. (Ed.), *El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas*. Economía. CEMCA-ORSTOM, Mexico : 253-291.
- Navarro Garza, H., 1998.** Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de suelos volcánicos endurecidos. In: Navarro Garza et al. (Eds), *Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates)*. ORSTOM-CP : 37-59.
- Peña, D., C. Zebrowski, 1992.** Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de Mexico y Tlaxcala (Mexico). ORSTOM-Paris, CP-Montecillo, J. Liebig Univ.-Giessen, UAT-Tlaxcala, 98 pp.
- Pérez Olvera, M. A., J. D. Etchevers Barra, H. Navarro Garza, R. Núñez Escobar, 2000.** Contribution of previous crop residues to the nitrogen pool in tepetates. *Agrociencia*, 34 : 115-125.
- Prat C., Ly B-T, Lepigeon I., Faugère G., Alexandre J.L., 1996.** Los sistemas agropecuarios de producción en tepetates, en cuatro comunidades del altiplano mexicano. In: Zebrowski et al. (Eds). 3^o *Symp. intern. Suelos volcánicos endurecidos, 12/1996*, ORSTOM-UE-PUCE-UCE, Quito, Ecuador: 482-491.
- Prat, C., Báez Pérez, A., Márquez Ramos, A., 1997.** Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetates t3, Texcoco, Mexico. In: Zebrowski et al. (Eds). 3^o *Symp. intern. Suelos volcánicos endurecidos, 12/1996*, ORSTOM-UE-PUCE-UCE, Quito, Ecuador : 371-383.
- Prat, C., V. M. Ordaz Chaparro, J. A. Rugama Urrutia, 2003.** Impact of mechanical fragmentation and agronomical management on the structure of tepetate. *Terra*, 21, 1 : 109-116.
- Prat, C., G. De Noni, J. Etchevers B., A. Baez, C. Hidalgo, G. Trujillo, 2012.** Réhabilitation des sols volcaniques indurés d'Equateur et du Mexique: comportements avant et après mise en culture. In: Roose E., Duchaufour H., De Noni G.,(Eds). *Lutte antiérosive : réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*. Actes Colloque Haïti 2011, IRD-AUF Edition, Marseille. 23 p.
- Quantín, P., 1992.** L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en Amérique Latine: processus géologiques et pédologiques. In: Zebrowski et al. (Eds). 1^o *Simp. intern. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991*, *Terra* num. esp. N°10 : 24-33.
- Quantín, P., C. Prat, C. Zebrowski, 1998.** Chap. 8 - Soil restoration and conservation: the tepetates - indurated volcanic soils- in Mexico. In: Harper, D.; Brown, Tony. (Eds), *The sustainable management of tropical catchment*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, GB : 109-119.
- Servenay, A., C. Prat, 2003.** Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma*, 117, 3-4 : 367-375.
- Sedov, S. N., E. Solleiro-Rebolledo, J. E. Gama-Castro, 2003.** Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *Catena*, 54 : 495-513.
- Siméon, R., 1887.** Diccionario de la lengua Nahuatl o mexicana. Siglo XXI, México, D.F.
- Velázquez Rodríguez, A., D. Flores Román, O. Acevedo Sandoval, 2001.** Aggregate formation in tepetate by effect of plant species. *Agrociencia*, 35, 3 : 311-320.
- Werner, G., H. Aeppli, G. Miehlich, E. Schönhals, 1978.** Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fund. alemana para la invest. cient., Tlaxcala, Mexico, 95 pp.
- Werner, G., G. Miehlich, A. Lückoff, W. Moll, 1988.** Die böden des staates Tlaxcala im zentralen hochland von Mexiko. Untersuchungen über ihre entwicklung, verbreitung, erosion und nutzung unter dem einfluss 3000-Jährigen ackerbaus, Stuttgart, Germany, 198 p.
- Zapata Martelo, E., B. Gutiérrez Garza, A. Flores Hernández, 2006.** Caminar por los tepetates. La vision de las mujeres de Hueyotlipán, Tlaxcala. COLPOS-CEDERU, Montecillo, Edomex, México, 313 p.
- Zebrowski, C., 1992.** Los suelos endurecidos en America Latina. In: Zebrowski et al. (Eds). 1^o *Simp. int. suelos volc. endurecidos, Mexico, Mexique, 10/1991*, *Terra* num. esp. N°10 : 15-23.

**Restauration de la productivité
des sols tropicaux et méditerranéens
Contribution à l'agroécologie**

Version préliminaire



Eric ROOSE
Editeur scientifique

IRD Editions
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT
MONTPELLIER, JUILLET 2015