

# Rehabilitation des sols volcaniques indurés d'Equateur et du Mexique: Comportement avant et apres mise en culture

Christian PRAT<sup>1</sup>, Georges DE NONI<sup>2</sup>, Jorge ETCHEVERS<sup>3</sup>, Aurelio BÁEZ<sup>4</sup>, Claudia HIDALGO<sup>5</sup> et German TRUJILLO<sup>6</sup>

<sup>1</sup>christian.prat@ird.fr, IRD-LTHE, France; <sup>2</sup>georges.denoni@ird.fr, IRD Dakar, Sénégal; <sup>3</sup>jetchev@colpos.mx, COLPOS, Mexique; <sup>4</sup>pbaez@colpos.mx, INIFAP, Mexique; <sup>5</sup>hidalgo@colpos.mx, COLPOS, Mexique; <sup>6</sup>german\_trujillo\_yandun@hotmail.com, SAG, Equateur.

## Résumé

En Amérique Latine, il existe des horizons volcaniques indurés qui couvrent de vastes superficies. Ces matériaux sont appelés «*cangahua*» en Equateur, «*talpetate*» en Amérique Centrale et «*tepetate*» au Mexique. Ce n'est qu'en arrivant au niveau des couches les plus dures, celles constituées par les *tepetates*, que l'érosion trouve une limite momentanée. Ces horizons sont en fait des tufs volcaniques, plus ou moins consolidés et indurés par des processus géologiques et pédologiques. En l'état naturel, ces «sols» sont stériles. Pauvres d'un point de vue chimique, ils ne sont pas plus attractifs au plan physique; leur induration et compaction limitent la circulation de l'eau et de l'air, le développement des racines et des microorganismes. Toutefois, il est possible de les convertir en sols productifs en l'espace d'une seule saison ! Pour cela, ils doivent être ameublés, puis émiettés en éléments plus fins pour constituer un support minéral poreux qui évoluera ensuite en sol grâce à l'apport de fertilisants organiques et/ou minéraux, et aux cultures.

Pour évaluer, le comportement au ruissellement et à l'érosion de ces matériaux, divers types d'observations et de mesures ont été réalisées pendant plusieurs années, en particuliers au Mexique et en Equateur. Plusieurs traitements traditionnels et améliorés ont été testés, de 1 à 1800 m<sup>2</sup> avec un simulateur de pluie ou sous pluies naturelles. Sous ces climats tempérés de montagne tropicale à saison sèche très marquée, les pluies sont localisées et brèves: 75% sont  $\leq 30$  mn et une intensité  $\leq 5$  mm h<sup>-1</sup>. Moins de 12 pluies par an, présentent des énergies importantes (200 à 700 J m<sup>-2</sup> mm) et génèrent 80% du ruissellement et de l'érosion.

A l'état naturel, le ruissellement va de 60-70% dès les premiers millimètres de pluie à 100%. En aval, les reports hydriques sont considérables et sont à l'origine d'érosion catastrophique. En haut de versant et à cause de leur dureté et compacité, la perte en matériaux est faible (1 à 30 t/ha/an). La mise en culture de ces matériaux après leur défonçage, change radicalement ce comportement. Le ruissellement diminue considérablement mais l'érosion devient active, évoluant dans une très large gamme de 1 à 200 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> selon le travail du sol.

Trois paramètres permettent de réduire l'érosion de ces nouveaux sols limoneux: un travail préliminaire laissant suffisamment de fragments grossiers et limitant la part des fines, les cultures en associations et une gestion adéquate des matières organiques afin d'augmenter au plus vite sa teneur. Dans ces conditions, la production d'orge au Mexique, dès la 1<sup>ère</sup> année, dépasse de 20% la moyenne régionale ! Ces tufs sans carbone, une fois convertis en sols, ont une capacité de capture de cet élément dans de très grande proportion, qui doit être pris en considération dans le cadre du réchauffement climatique. Au Mexique, en 4 ans, pour des cultures ayant très peu d'apports de C, la concentration de C est passé de 0 à 5 gr kg<sup>-1</sup> de sol, alors qu'un sol cultivé et recevant de forts apports de C, a vu son stock s'élever à 20 gr kg<sup>-1</sup> de sol. Dans ces pays, la transformation des tufs volcaniques indurés en sols cultivables est donc possible si l'on suit quelques règles simples avant et après la création de ces nouveaux sols limoneux. Reste que les coûts de ces transformations sont très élevés et hors de porté du petit paysan. Dans la mesure où elles jouent un rôle socio-économique (maintient de l'agriculture, réduction des inondations et destructions qui en découlent) et environnemental (séquestration du C), l'état devrait assumer une grande part de ces frais. Il pourrait se financer lui même en utilisant par exemple l'argent récupéré de cette capture du carbone via le marché international du carbone.

**Mots-clés** : Équateur, Mexique, ruissellement, érosion, restauration, conservation, carbone, sols volcaniques indurés.

## Resumen

En América Latina, existen horizontes volcánicos endurecidos que cubren grandes áreas. Estos materiales son llamados «*cangahua*» en Ecuador, «*talpetate*» en América Central y «*tepetate*» en México. Los suelos que los cubrían fueron desgastados por la erosión. Es solamente al llegar a las capas más duras, las conformadas por los *tepetates/cangahuas*, que este proceso destructivo encuentra momentáneamente un límite. Estos horizontes son de hecho tobas volcánicas, más o menos consolidadas y endurecidas por procesos geológicos y edáficos.

En su estado natural, estos "suelos" no son fértiles para la agricultura. Pobres desde un punto de vista químico, tampoco son atractivos a nivel físico: su endurecimiento y compactación limitan la circulación del agua y del aire, y el desarrollo de las raíces y los microorganismos. Sin embargo, es posible convertirlos en suelos productivos en una sola temporada! Para esto, hay que aflojarlos, luego molerlos en elementos más finos para conformar un soporte mineral poroso inorgánico que luego evolucionará a suelo gracias a los aportes de fertilizantes orgánicos y/o minerales, así como a los cultivos.

Para evaluar el comportamiento de la escorrentía y la erosión de estos materiales, se realizaron varios tipos de observaciones y mediciones durante varios años, especialmente en México y Ecuador. Se comprobaron tratamientos tradicionales y mejorados desde 1 hasta 1800 m<sup>2</sup> con un simulador de lluvia o bajo lluvia natural. En esta época seca templada a tropical de montaña pronunciada, las lluvias son localizadas y de corta duración: 75% ≤ 30 minutos con una intensidad ≤ 5 mm h<sup>-1</sup>. Son menos de 12 lluvias al año las que tienen alta energía (de 200 a 700 J m<sup>-2</sup> mm) y generan 80% de la escorrentía y la erosión.

En el estado natural, la escorrentía es de 60-70% a partir de los primeros milímetros de lluvia hasta el 100%. Aguas abajo, las corrientes de agua pueden ser importantes y causar una erosión catastrófica. Aguas arriba y debido a su dureza y compacidad, la erosión de estos materiales es débil (de 1 a 30 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Poner a cultivar estos materiales después de romperlos, cambia dramáticamente este comportamiento.

La escorrentía disminuye significativamente, pero la erosión se activa, evolucionando en una gama muy amplia, desde 1 hasta 200 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, de acuerdo al tipo de trabajo de suelo que se hizo. Tres parámetros permiten minimizar la erosión al máximo de estos nuevos suelos francos: 1/un trabajo preliminar que deja suficientes fragmentos gruesos y que limita la proporción de elementos finos, 2/ cultivos en asociaciones y 3/ una gestión y manejo adecuado de la materia orgánica para incrementar lo antes posible su contenido. Bajo estas condiciones, la cosecha de cebada en México, desde el primer año, superó el promedio regional de un 20%! Estas tobas sin carbono, una vez convertidas en suelos, tienen la capacidad de capturar este elemento en una muy alta proporción, lo cual debe tenerse en cuenta en el contexto del calentamiento global. En México, en 4 años, para cultivos con muy poco C, su concentración se incrementó de 0 a 5 g kg<sup>-1</sup> de suelo, mientras que con un nuevo suelo cultivado y que recibe altas tasas de C, el almacenaje de este elemento llegó hasta los 20 g kg<sup>-1</sup> de suelo. En estos países, la transformación de toba volcánica endurecida en suelos de cultivo es posible entonces, siempre y cuando se sigan algunas reglas simples antes y después de la creación de estos nuevos suelos francos.

Sin embargo, los costos de estas transformaciones son muy altos y fuera del alcance de los pequeños agricultores. En la medida en que desempeñan un importante papel socio-económico (mantenimiento de la agricultura, reducción de las inundaciones y la destrucción que conlleva) y ambiental (captura de carbono), el Estado debería asumir la mayor parte de estos costos. Podría financiarse gracias a los ingresos obtenidos de la captura de carbono a través del mercado internacional de este elemento.

**Palabras-claves** : Ecuador, México, Nicaragua, escurrimiento, erosión, restauración, conservación, carbono, suelos volcánicos endurecidos, *cangahua*, *tepetate*, *talpetate*.

## Abstract

In Latin America, there are hardened volcanic horizons that cover large areas. These materials are called "*cangahua*" in Ecuador, "*talpetate*" in Central America and "*tepetate*" in Mexico. The soils covering them were worn out by erosion. It is only by reaching the hard layers, formed by the *tepetates/cangahuas* that this destructive process is temporarily capped. These horizons are in fact volcanic tuff more or less consolidated and hardened by geological and soil processes. In their natural state, these "soils" are not fertile for agriculture. Poor from a chemical point of view, they are not physically attractive either; their hardening and compaction limit the movement of water and air, and the development of roots and microorganisms.

However, it is possible to turn them into productive soil in one sole season! To do this, we must loosen them, then grind them into finer elements to form an inorganic porous mineral support, which will then evolve and turn into soil thanks to the contributions of organic fertilizers and/or minerals, as well as crops. To evaluate the performance of the runoff and erosion of these materials, several types of observations and measurements were made for several years, especially in Mexico and Ecuador. Traditional treatments were tested and improved from 1 to 1800 m<sup>2</sup> with rainfall simulator or under natural rain.

In this temperate to tropical dry steep mountain season, rains are localized in certain areas and for short periods: 75%  $\leq$  30 minutes with an intensity  $\leq$  5 mm h<sup>-1</sup>. There are less than 12 rains per year, of high energy (200 to 700 J m<sup>-2</sup> mm), and generate 80% of runoff and erosion.

In natural state, runoff is 60-70% from the first millimeters of rain up to 100%. Downstream water flows can be significant and cause catastrophic erosion. Upstream and due to their hardness and compactness, the erosion of these materials is weak (1 to 30 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). Cultivating these materials after breaking them leads to substantial changes in their behavior.

Runoff decreases significantly, but erosion is active, evolving into a very wide range from 1 to 200 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> according to the type of tillage that was done. Three parameters are used to minimize erosion to the best in these new loam soils: 1/ preliminary work leaving enough thick fragments and limiting the proportion of fine elements, 2/ crop associations, and 3/ arrangement and proper management of organic matter to increase its content as soon as possible. Under these conditions, barley crop in Mexico, from the first year, surpassed the regional average of 20%! These tuffs without carbon, once converted into soil, have the ability to capture this element in a very high proportion, which should be considered in the context of global warming. In Mexico, in 4 years, in crops with very little C, its concentration increased from 0 to 5 g kg<sup>-1</sup> soil, while in a new cultivated land, receiving high rates of C, the storage of C reached 20 g kg<sup>-1</sup> soil. In these countries, the transformation of hardened volcanic tuff into agricultural soils is then possible, provided some simple rules are followed before and after the creation of these new loam soils.

However, the costs of these transformations are very high and unaffordable for small farmers. As they play an important socio-economic (agriculture maintenance, reduction of flooding and the destruction involved) and environmental role (carbon sequestration), the State should assume most of these expenses. They could be financed with the proceeds of carbon sequestration through the international carbon market.

**Key words** : Ecuador, Mexico, Nicaragua, runoff, erosion, restoration, conservation, carbon, hardened volcanic soils, *cangahua*, *tepetate*, *talpetate*.

## INTRODUCTION

Les Andosols sont des sols volcaniques qui couvrent environ 1% des surfaces cultivées soit 110 millions d'ha (FAO/EC/ISRIC, 2003). On peut y associer d'autres sols dérivés de matériaux d'origine volcanique classés comme Cambisols, Acrisols, Ferralsols, Phaeozems, Leptosols et Regosols (IUSS WRB, 2007). Ainsi on peut estimer qu'environ 10% des surfaces cultivées sont d'origine volcanique ! Dans certains pays, comme ceux d'Amérique Centrale, le Mexique et les pays andins, ce pourcentage peut varier de 20 à 90% des surfaces cultivées ! En outre, ces sols-supportent des densités de population très élevées allant parfois jusqu'à 90% de la population totale d'une région ou d'un pays ! En règle générale, ces sols possèdent un ou des horizons indurés plus ou moins proches de la surface et couvrent d'immenses surfaces: plus de 3 000 km<sup>2</sup> en Equateur (Custode et al., 1992); 2 500 km<sup>2</sup> au Nicaragua (Prat et Quantin, 1992); environ 15 000 km<sup>2</sup> en Colombie (Faivre et Gaviria, 1991); 30 700 km<sup>2</sup> au Mexique (Zebrowski, 1992). Ces matériaux sont appelés *toba* au Chili (Casanova et al., 2009) et au Pérou (Nimlos & Zamora, 1992), *cangahua* de la Colombie jusqu'au Pérou (Zebrowski, 1992), *talpetate* en Amérique Centrale (Prat et Quantin, 1992) et *tepetate* au Mexique (Werner et al., 1988; Peña y Zebrowski, 1992; Quantin et al., 1992). *Talpetate* et *tepetate* sont des termes d'origine Nahuatl pour le Mexique et l'Amérique Centrale et signifie « lit de pierre » (Simeon, R, 1887; Williams, 1992). En Colombie (Faivre & Gaviria, 1991) et Equateur (Colmet-Daage, 1969; Winckell et Zebrowski, 1992) le terme Aymara *cangahua*, fait également référence à une couche dure. Au Pérou et au Chili, ce sont les termes scientifiques *hardpan* et/ou *toba* (tuf, en espagnol) qui sont utilisés. Par commodité et du fait de leurs caractéristiques similaires, nous désignerons ici, sauf précision, comme *tepetates/canguahuas* ces matériaux indurés d'origine volcanique.

Quand ces horizons indurés affleurent, notamment sous l'effet de l'érosion, il est impossible de les cultiver. L'absence de fertilité de ces sols a de lourdes conséquences sur les populations locales, déjà souvent marginalisées. De plus, l'imperméabilité de ces matériaux provoque à l'aval en cas de fortes pluies, de graves inondations dans les parties basses des vallées. Les *tepetates-cangahuas*, ont toujours fait l'objet d'un usage agricole ou architectural. Au Mexique de nombreuses pyramides, comme la fameuse pyramide du soleil (en fait de Tlaloc, dieu de la pluie !) à Teotihuacan ou le site de Cacaxtla (Tlaxcala), ont été élevées avec des blocs de *tepetates* (Aliphath & Werner, 1994). Sur l'altiplano, beaucoup de maisons rurales sont encore souvent construites avec ces matériaux.

Sous l'effet de la pression démographique, le manque de terre a conduit à travailler ces matériaux affleurants et stériles afin de créer de nouveaux sols. Ils le furent d'abord à la main à l'aide de pic. La mécanisation via des tracteurs puis des engins plus puissants comme des bulldozers arrive en 1960. Le travail de défonçage devient alors plus rapide, plus profond mais aussi bien plus érosif qu'autrefois. Quant aux coûts, ils sont impossibles à assumer par des petits paysans sans aide financière.

En Equateur, à cause notamment des très fortes pentes, c'est le système des terrasses progressives avec formation de bord de terrasse à partir de blocs de *cangahua* qui est le plus souvent utilisé. Le défonçage se faisant le plus souvent à la main, les fragments de *cangahua* sont relativement gros, générant ainsi un macro relief favorisant l'infiltration des pluies et limitant les risques d'érosion hydrique. Au Mexique, par contre, les pentes sont plus modérées et la formation de terrasses aplanies au bulldozer sont privilégiées. Mais, si le nombre de passages et la vitesse des engins sont trop élevés, le *tepetate* est réduit en poudre, ce qui favorise une érosion hydrique.

Il est donc très important pour les pays d'Amérique Latine situés sur la dorsale Andes-Sierra Madre, de savoir ce que sont réellement les *tepetates-cangahuas*, de connaître les conditions de leur dégradation afin de comprendre et de trouver des solutions pour éviter leur destruction, de proposer leur réhabilitation agricole et forestière durable et ainsi réduire les risques d'inondations en aval de ces zones.



Photos 1a) *Toba* (Chillán, Chili) 1b) *Cangahua* (Equateur) (Prat, C.)



Photos 1c) *Talpetate* (Masaya, Nicaragua) 1d) *Tepetate (T)* (S. M. Tlaixpán, Mexique) (Prat, C.)

### **Des propriétés physiques et chimiques conditionnées par leur origine géologique et pédologique**

Ces horizons volcaniques indurés sont associés à l'axe volcanique qui va de l'Alaska jusqu'à la Terre de feu. Zone de subduction des plaques pacifiques sous les plaques continentales américaines, le volcanisme le plus fréquent est de type explosif, et en particulier phréato-magmatique. Celui-ci a la particularité d'émettre des coulées de boues plus ou moins chaudes et liquides, qui peuvent couvrir des milliers de kilomètres carrés. Les émissions de cendres qui suivent ces dépôts et qui les recouvrent, formeront les sols.

Les *tepetates-cangahuas* doivent donc leur consolidation et induration à des processus géologiques sur lesquels peuvent se surimposer des processus pédologiques, renforçant encore leur compacité et leur induration.

Sous l'effet de l'altération initiale de ces matériaux pyroclastiques, il peut y avoir une fusion des verres formant un squelette poreux et/ou des argiles de type halloysite ou metahalloysite localisées en bordure des verres et/ou remplissant les pores occlus. La nature de ces matériaux, leur mode de dépôts, de dessèchement et de porosité, font qu'ils deviendront massifs, compacts et peu perméables.

Cette structure massive initiale, peut être renforcée dans un second temps sous l'effet de dépôts liés à des processus de dissolution et déposition. La calcite et/ou la silice, tout comme l'altération des matériaux en argile peuvent jouer un rôle important. Les conditions de température et la pluviométrie sont alors des facteurs clefs qui orienteront et

intensifieront ces processus : 1/ sous climat à saison marquée, les processus de cimentation secondaire sont soit insignifiants, soit hérités de paléoclimats (Faivre y Gaviria, 1992; Hidalgo et al., 1999; Prat et Quantin, 1994; Sedov et al., 2003; Zebrowski, 1997). Dans ce cas, se sont souvent des carbonates qui ont rempli les porosités internes des agrégats et leur surface. L'induration peut alors être particulièrement marquée (Fedoroff et al, 1994). 2/ sous climat humide, la dissolution en haut de profil et/ou de versant et le dépôts de silice dans le profil et/ou bas de versant peut créer une induration pédologique (Campos et Dubroeuq, 1990; Jongmans et al., 2000). Ces processus sont le plus souvent encore actifs et concernent surtout des niveaux pédologiques relativement profonds.

Les *tepetates* non carbonatés ont une composition granulométrique où les argiles représentent entre 35 et 42% (Penã et Zebrowski, 1992), alors que les *talpetates* au Nicaragua (Prat et Quantin, 1992), les *cangahuas* en Equateur et les *tepetates carbonatés* au Mexique (Quantin et al., 1993), n'en possèdent qu'une dizaine de pourcents.

Ces matériaux compacts ont une porosité faible et qui est de plus, constituée de bulles occluses. La circulation de l'eau et de l'air ainsi que le développement des racines et des microorganismes sont donc extrêmement limités au sein de la matrice de ces matériaux.

Tableau 1: Caractéristiques physiques des tepetates, talpetates et cangahuas (Sources : <sup>1</sup> Penã & Zebrowski, 1992; <sup>2</sup> Prat et Quantin, 1992; <sup>3</sup> Quantin, 1997).

		Argile %	Limon fin %	Limon grossier %	Sable fin %	Sable grossier %	Densité réelle	Densité apparente	Porosité totale %
Tepetate <sup>1</sup> (Mexique)	Min.	25,1	12,8		21,7		2,3	1,2	32
	Moy.	35,6	21,2		43,2		2,4	1,5	50
	Max.	42,0	41,8		60,4		3,0	1,6	64
Talpetate <sup>2</sup> (Nicaragua)	Min.	12,5	39	14	24,5	10	2,7	1,0	50
	Moy.	13,3	38,5	13	28,3	7	2,8	1,1	65
	Max.	14	38	12	32	4	3,0	1,3	70
Cangahua <sup>3</sup> (Equateur)	Min.	6,9	15,2	5,1	18,2	9,7			
	Moy.	12,7	26,6	8,7	26,0	24,3			
	Max.	23,6	40,7	11,3	35,2	40,3			

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des tepetates, talpetates et cangahuas (Sources : <sup>1</sup> Peña & Zebrowski, 1992; <sup>2</sup> Etchevers et al. 1992; <sup>3</sup> Prat et Quantin, 1992; <sup>4</sup> Quantin, 1997)

		pH eau	pH KCl	C %	N tot %	P assi ppm	CEC	Bases échangeables Ca Mg Na K mg/100 gr de so l				S	S/T	FeO <sub>2</sub> libre %
Tepetate <sup>1,2</sup> (Mexique)	Min.	7,3	6,3	0,08	0,01	3≤	17	6,7	4,5	0,4	0,6		58	1
	Moy.	8	7	0,15	0,02	3≤	25	15	7	1	2		80	1
	Max.	8,9	7,4	0,36	0,07	3≤	41	45,3	11,9	3,9	3,4		100	3
Talpetate <sup>3</sup> (Nicaragua)	Min.	6	4,4		tr		20						20	
	Moy.	6,5	5	0,5	0,07	3≤	30	20,4	5,4	0,2	2,5		50	5
	Max.	7	5,4				40						≥50	
Cangahua <sup>5</sup> La Tola (Equateur)	Min.	7,3					22.0	14.2	7.3	0.3	1.6	23.4	100	
	Moy.					3≤	16.2	9.1	5.7	0.5	0.4	15.7	97	
	Max.	8,4					16.2	9.1	5.7	0.5	0.4	15.7	97	

S/T : Taux saturation

D'un point de vue chimique, ces matériaux ont un pH neutre, à légèrement alcalin qui peut être franchement alcalin (8,5 à 9) dans le cas d'encroulements calcaires. Les teneurs en C et N ont des teneurs très faibles et sont réduits pratiquement à l'état de traces tout comme le phosphore assimilable. Les teneurs en bases échangeables sont élevées avec une capacité d'échange cationique élevée ( $\geq 25 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ ). La vie microbienne est extrêmement réduite tant en diversité qu'en nombre d'organismes vivants (Sánchez et al.,

1987, Ferrera et al, 1992). Ces matériaux ont donc une faible fertilité qu'il faudra profondément améliorer si l'on souhaite voir pousser des plantes (Etchevers et al., 1998).

Les *tepetates-canguahuas* sont donc des matériaux géologiques altérés au cours de leur mise en place ; il n'y a plus de processus d'induration actuellement (sauf exception en zone perhumide). En d'autres termes, rompre ces matériaux n'entraîne aucun risque de reformation d'un horizon induré et massif.

### **Une distribution topographique particulière**

L'origine géologique des *tepetates-canguahuas* explique la distribution topographique de ces matériaux qui se répartissent de façon plus ou moins régulière, du sommet jusqu'à la base du volcan qui les a émis. Toutefois, masqués par les cendres qui les recouvrent, ils n'affleurent que lorsque l'érosion a décapé les niveaux sus-jacents. La cartographie de ces affleurements via des observations de terrain et des traitements d'images satellitaires, montre qu'au Mexique (Servenay & Prat, 2003), en Equateur (Custode et al., 1992; de Noni & Viennot, 1997) ou au Nicaragua (Bice, 1985; Prat & Quantin, 1994) leur distribution est liée à des conditions climato-topographiques et à certains usages agropastoraux.

Dans des zones climatiques ustic - isothermic (Soil Taxonomy, 2010) ayant des périodes de sécheresse très marquée de 4 à 6 mois et dont la pluviométrie varie entre 500 et 800 mm an<sup>-1</sup>, les *tepetates-canguahuas* affleurent principalement dans les zones de piedmonts dès que les pentes sont supérieures à 5%. Ces zones sont densément peuplées, et les terres ont été ou sont cultivées de façon intensive et supporte une charge animale importante. En Equateur, la zone concernée va de 2 400 à 2 800 m d'altitude alors que pour le Mexique, elle est comprise entre 1 800 et 2 400 m, Les sols à horizon induré "duric" et "calcaric", proche de la surface ou en surface, ont des propriétés mixtes "petrocalcic" (calcaire) et de "duripan" (silicifié) si l'on suit la classification de l'USDA (2010). Au Nicaragua, entre 50 et 500 m d'altitude, le *talpetate* a les propriétés physiques d'un "duripan" sans être carbonaté.

Sous climat subhumide, caractérisé par une transition de régime ustic à udic et isomésic avec une saison sèche de 3 à 4 mois et une pluviométrie de 700 à 1 200 mm an<sup>-1</sup>, les horizons indurés apparaissent également mais de façon plus limitées. Les zones concernées en Equateur, sont comprises entre 2 800 et 3 400 m, au Mexique, entre 2 400 et 2 600 m, et au Nicaragua entre 500 et 700 m, L'horizon induré est de type "fragipan" (USDA, 2010) : dur à l'état sec mais friable et plastique à l'état humide.

Au delà de 3 400 m en Equateur, de 2 600 m au Mexique et de 700 m au Nicaragua, le climat est humide à perhumide avec un régime udic-perudic et isomésic (limite à isofrigid), une nébulosité diurne fréquente et une pluviosité de 1 200 à 1 500 mm an<sup>-1</sup>. C'est le domaine des *paramos*, des forêts et des prairies d'altitudes. Les horizons indurés se trouvent à plus de 50 cm de profondeur de la surface du sol qui sont des sols à caractères andiques très marqués. Ils n'affleurent que très rarement. Ils sont plus épais, compacts plutôt qu'indurés et extrêmement friables.

### **Des tufs pyroclastiques indurés ameublés pour être cultivés**

Sous l'effet de l'érosion hydrique, le plus souvent d'origine anthropique, les sols meubles sont érodés et les couches les plus dures et compactes apparaissent alors. Impropres à l'agriculture et limitant de façon drastique la vie même de la végétation la moins exigeante, ces terrains sont alors abandonnés. Seuls, de maigres pâturages extensifs subsistent et sont utilisés par les membres les plus pauvres des communautés rurales (Prat et al., 1997; de Noni et al., 2001). Quand les zones érodées couvrent de très grandes surfaces, les conséquences sociales sont très graves : les paysans émigrent ou vont cultiver toujours plus haut vers de nouvelles terres qui seront à leur tour soumises à l'érosion (Gondard & Mazurek, 2001).

Il est toutefois possible d'inverser cette situation et revenir à des conditions plus favorables à une agriculture rentable et durable. Si l'induration a une origine

essentiellement géologique ou paléoclimatique (ce qui est le plus souvent le cas), on peut en effet envisager une décompactation mécanique sans craindre une réapparition de la cimentation sous l'effet de processus pédologiques. On pourra alors, moyennant un investissement plus ou moins important, convertir ces matériaux stériles en sols productifs, et ce, en l'espace d'une seule saison !

Pour cela, les *tepetates/cangahuas* doivent être ameublés, puis émiettés en éléments plus fins pour constituer un support minéral poreux. Les premiers travaux de réhabilitation au Mexique ont visé à reforester les zones érodées, puis très rapidement, ce sont des champs qui ont été créés (Navarro & Prat, 1996). Des apports de fertilisants organiques et/ou minéraux permettent alors de faire évoluer en sols, ces matériaux meubles et inertes (Cangás & Trujillo, 1997; Pimentel, 1992; de Noni et al., 2000). Les rendements agricoles obtenus, seront à la hauteur des investissements consentis (Navarro & Zebrowski, 1992). Encore faut-il que tous ces efforts ne soient balayés par l'érosion qui emporterait ces nouveaux sols. C'est pourquoi, de nombreuses études portant sur la compréhension de l'origine de l'érosion, ses mécanismes d'actions et les moyens de la limiter ou de la réduire, ont été menées dans ce contexte géo-pédologique (de Noni et al., 1994). L'idéal, reste que plutôt que de créer de nouveaux sols, mieux vaudrait protéger ce qui existe et ne pas arriver à ces situations extrêmes.

Au Nicaragua, les études portant sur l'érosion ont été menées sur les sols recouvrant les *talpetates* et non sur les *talpetates* eux-mêmes. En effet, les affleurements de ces matériaux étant pour l'instant encore très rares, les recherches portent sur les conditions de conservation des sols en place et non sur les conditions de mise en culture des *talpetates*.

Nous ne présenterons donc ici que les résultats obtenus au Mexique et en Equateur, portant sur les *tepetates* et *cangahuas* affleurants.



Photos 2a. Erosion sur cangahua, Equateur (de Noni). 2b : Versant pommes de terre avec ruissellement concentrée, Equateur (de Noni).





Photos 2c. Erosion sur *tepetate*, Tlaxcala, Mexique.

2d : Erosion sur *tepetate*, en ravines Tlaxcala, Mexique (noter la succession de couches indurées de *tepetate* et de paléosols) (Prat, 1994).

### Des conditions climatiques favorisant l'érosion hydrique.

Les études ont été menées principalement dans la zone climatique de type tropical à tempéré montagnard à saison sèche marquée. Ces climats associent une température moyenne annuelle régulière (isoméscic) de 17°C, tempérée, avec de grandes variations diurnes: la température moyenne des minimums est de 10°C tandis que celle des maximums est de 25°C; mais une variation supérieure à 20°C est couramment observée en saison sèche, où les nuits claires de sévères gelées apparaissent. Le climat peut être également tropical à tempéré semi-humide à saison sèche marquée par la faible amplitude des températures moyennes journalières, mensuelles et annuelles et surtout par une répartition bimodale des pluies (maximum en octobre à juin pour l'Equateur et de juin à octobre pour le Mexique). Le total annuel fluctue autour de 700 mm et est extrêmement variable non seulement d'une année sur l'autre mais aussi au sein d'une même année pendant laquelle une période très pluvieuse peut succéder à une période très sèche. On peut ainsi passer d'une valeur associée à un régime subaride (450 mm), à celle d'un régime subhumide (1050 mm) l'année suivante !

Tableau 3. Pluviométrie moyenne annuelle La Tola et à Cangahua, Equateur: 1986-1991 et 1994-1996 (de Noni et al., 2000).

	86-87	87-88	88-89	89-90	90-91	moy 86-91	94-95	95-96	moy 86-96
Cangahua	452	436	692	489	700	554	369	676	545
La Tola	688	706	692	628	777	685	750	1049	746

NB. une saison des pluies est répartie sur 2 années calendaires, d'octobre à juin.

Tableau 4. Caractéristiques principales des pluies de 1992 à 1996 à San Miguel Tlaixpán, Mexique (Prat et al., 1997).

	1992	1993	1994	1995	1996	'92-'96
Nombre de jours avec pluies	126	81	105	120	90	105
Hauteur totale (mm)	654	411	736	768	587	627
% de la hauteur de pluies enregistrées vs totales	100	96	81	69	72	83
R métrique	259	96	216	197	204	194
R us	149	55	124	113	118	112
Essais de classification de l'année pluviométrique	Normale et érosive	Très sèche	Normale	Irrégulière	Sèche et irrégulière	Année moyenne

Sous ces climats à saison sèche très marquée, les pluies sont très localisées et très brèves : 75% durent moins de 30 mn et ont une intensité très faibles (<5 mm/h). En fait, seules quelques pluies dont le nombre est variable selon les années (de 5 à 20), présentent une énergie suffisamment importante (de 200 à 700 t m ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>) pour être susceptible d'éroder sévèrement les sols. Ces valeurs, bien que fortes, n'ont rien d'exceptionnelles au niveau mondial. Reste qu'il faudrait plus d'années d'enregistrements pour être assuré d'avoir mesuré les évènements les plus agressifs.

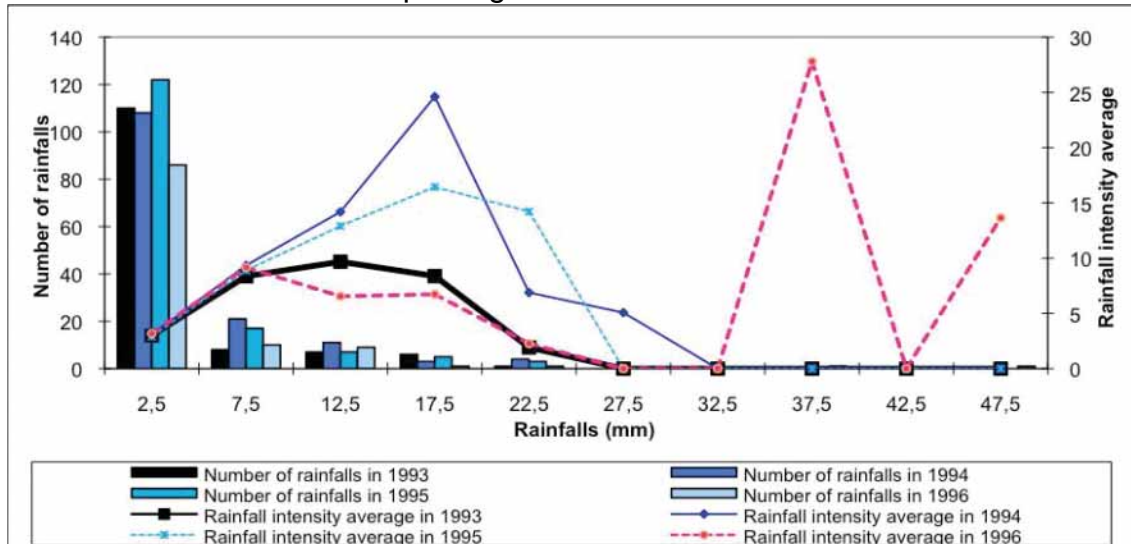


Figure 1. Quantité et intensité moyenne des pluies tombées entre 1993 à 1996 à San Miguel Tlaixpan, Mexique (Prat et al., 1997).

Dans nos conditions d'études, l'énergie cinétique totale des pluies est un critère explicatif de l'érosivité des pluies bien meilleur que leur intensité ou leur hauteur. A défaut, l'analyse de la pluie sous ces climats, doit se faire sur la base de l'intensité durant 10 à 15 mn, et non 30 mn, temps trop long au regard de la courte durée des pluies (Prat, 1997). Dans ce cas, l'érosivité moyenne des pluies baisse trop et ne reflète plus la réalité. L'indice d'érosivité des pluies de Wischmeier basé sur une  $I_{30}$  et couramment utilisé en Amérique Latine, sous estime donc largement la réalité et devrait être remplacé par l'énergie totale.

En plus de l'érosivité potentielle des pluies, la période de l'année et l'état de surface s'y référant jouent un rôle déterminant quant aux processus générant ruissellement et érosion. Ainsi, le second facteur important est l'état du sol, et en particulier, l'existence ou non d'un couvert pouvant servir de protection aux impacts des gouttes de pluies (Roose, 1977; Casenave & Valentin, 1989). Or la plupart des pluies les plus intenses dans ces régions, se produisent à la fin de la saison sèche, c'est à dire quand les sols sont traditionnellement peu couverts et donc potentiellement très érodables. Ne pouvant agir sur les pluies, il ne reste que la possibilité de développer des stratégies liées à la gestion du sol et de sa couverture de surface pour réduire l'érosion hydrique.

Pour comprendre les processus en jeu, étudier et comparer les meilleurs systèmes agraires vis à vis du ruissellement et de l'érosion hydrique, des campagnes de mesures et d'observations ont été conduites à plusieurs échelles (depuis le cm<sup>2</sup> jusqu'à plus de 1000 m<sup>2</sup>) en laboratoire comme en plein champs, sous pluies artificielles dont les caractéristiques ont été fixées à partir de l'analyse des pluies naturelles et sous pluies naturelles, et ce pendant plusieurs années et dans plusieurs sites.

### L'étude des processus érosifs sous pluies simulées.

Les simulateurs de pluies utilisés le plus couramment au Mexique pour étudier les tepetates, sont d'une part, le simulateur à disques giratoires de type Morin utilisé en laboratoire sur des surfaces de 0,4 m<sup>2</sup> (Delgadillo Piñon et al., 1989) et d'autre part, l'infiltromètre à aspersion modèle Purdue qui teste des sols en place sur des parcelles de

7x1 m (Alcala & Oropeza, 1998). En Equateur, c'est essentiellement l'infiltromètre à aspersion, modèle ORSTOM, qui a été utilisé sur des parcelles de 1 m<sup>2</sup> et sur des pentes variant de quelques % à près de 20% (De Noni et al. 1990, Leroux & Janeau, 1997; Podwojewski et al., 2008). Ces essais sont complétés par des tests de stabilités structurales, d'infiltrométrie, des suivis des teneurs en eau, etc... Bien que les protocoles ne soient jamais les mêmes, puisqu'adaptés à la réalité locale, il est malgré tout possible de comparer les résultats obtenus et d'en dégager des tendances générales très significatives. Nous ne considérerons ici par simplification, que les essais sur sols sec, avant le début de la saison des pluies.

Une campagne de mesure de simulation de pluies avec le modèle Purdue menée au Mexique (Rivera & Oropeza, 1998) a comparé le comportement d'un même tepetate ayant subi 3 types de traitements différents: 1/ à l'état naturel, 2/ venant d'être préparé pour une mise en culture après un défonçage sur 15 cm de profondeur et 3/ défoncé sur plus de 30 cm de profondeur et cultivé depuis 5 ans. Deux intensités ont été appliquées : la première de 40 mm h<sup>-1</sup> puis 60 mm h<sup>-1</sup> pendant des durées variables (Tab. 5).

Tab. 5. Caractéristiques du ruissellement et du transport solide sous pluies simulées sur tepetate sec et ayant subi différents traitements (D'après Rivera, P. & Oropeza, JL, 1998).

Traitement des parcelles	Intensité mm.h <sup>-1</sup>	Durée mn	Hauteur mm	Lame infiltrée mm	Coef infiltration %	Coef. Ruissellement %	Perte en terre g.mn <sup>-1</sup>	Perte en terre t.ha <sup>-1</sup>
Tepetate naturel	40	51	34	6,2	18	82	153	13,1
	60	25	25	5,0	20	80	227	19,5
Tepetate venant d'être mis en culture	40	105	70	45,4	65	35	6	0,5
	60	56	56	24,7	44	56	27	2,3
Tepetate cultivé depuis 5 ans	40	45	30	12,9	43	57	63	5,4
	60	30	30	5,8	19	81	273	23,4

En Equateur, la *cangahua* a été testée selon deux protocoles : dans un cas, la *cangahua* est fracturée manuellement, à l'aide de pic alors que dans l'autre, elle l'a été à l'aide d'un bulldozer et est donc similaire aux cas testés au Mexique.

Dans le cas des essais menés par de Noni et al. (1990), chaque expérimentation comporte une série de pluies successives d'intensité croissante : 20, 40, 60 et 80 mm h<sup>-1</sup> pendant 20 mn chacune, soit une pluie totale de 67 mm pendant 80 mn. La 2<sup>ème</sup> pluie est réalisée 2 h après la 1<sup>ère</sup>, et la 3<sup>ème</sup> l'est 24 h après la 2<sup>ème</sup>. Les résultats présentés ici, correspondent aux moyennes de ces 3 pluies.

Tab. 6. Caractéristiques du ruissellement et du transport solide sous pluies simulées sur *cangahua* sèche et ayant subi différents traitements (D'après de Noni et al., 1990).

Pente %	Préparation du sol	Culture	Indice rugosité	Humidité %	Pi mm	Lame ruis. mm	Lame infiltrée mm	Kr %	Sed gr	
4	Très fine	95%<2cm	Sans	10,1	13,4	19,9	4,5	46,9	10,8	16,5
12	Fine	70%<2cm	Sans	10,8	13,7	17,5	0,2	67,7	0,3	0,0
16	Fine	70%<2cm	Maïs	10,6	14,1	14,6	0,9	66,9	1,4	0,0
16	Grossière	50%<2cm	Sans	11,3	12,0	25,1	1,4	65,4	2,2	0,0
21	Grossière	et	Maïs	12,2	9,2	21,6	0,3	55,9	0,6	0,0
6	Grossière	39%>5cm	Orge	11,4	13,2	17,1	1,0	55,4	1,9	9,0

Pi : Pluies d'imbibition, Kru : Coefficient de ruissellement utile

Dans le cas des essais menés par Podwojewski et al. (2008), chaque expérimentation comporte une série de pluies successives d'intensité croissante : 20, 40, 60 et 80 mm<sup>-1</sup> pendant 15 mn chacune, soit une pluie totale de 50 mm pendant 1h. La 2<sup>ème</sup> pluie est réalisée 3 h après la 1<sup>ère</sup>, et la 3<sup>ème</sup> l'est 8 h après la 2<sup>ème</sup>.

Tab. 7. Caractéristiques du ruissellement et du transport solide sous pluies simulées sur 1 m<sup>2</sup> cangahua sèche et ayant subi différents traitements (D'après Podwojewski et al, 2008).

Traitements	Taille des particules	Pi			Kr			Sed		
		-----mm-----			-----%-----			-----gr m-2-----		
		Pluie1	Pluie2	Pluie3	Pluie1	Pluie2	Pluie3	Pluie1	Pluie2	Pluie3
Matières Organiques*	Grossiers	15,2	3,6	3,8	49,5	76,0	82,7	85	96	103
	Fines	17,0	6,0	4,8	41,1	73,0	79,9	107	112	159
Engrais vert**	Grossiers	9,4	2,1	1,9	32,7	54,7	74,4	44	70	80
	Fines	12,6	3,5	3,2	38,7	76,2	83,4	93	118	176
Sans fertilisation minérale	Grossiers	15,2	4,6	4,2	38,5	61,8	76,4	120	142	173
	Fines	15,9	2,7	2,4	37,6	62,3	69,5	62	58	46
Avec fertilisation minérale	Grossiers	23,2	8,7	7,4	19,4	50,4	62,9	36	57	36
	Fines	21,3	8,4	5,8	26,9	54,8	65,0	28	44	49
En friche	Grossiers	22,9	4,9	2,9	21,8	61,0	72,2	457	935	814
	Fines	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Matières Organiques\*=40 t ha<sup>-1</sup> fumier; \*\*Engrais verts = résidus de cultures+ fertilisation minérale faible  
Particules fines <10 cm; Particules grossières 20 cm

De l'ensemble de ces essais, il ressort qu'en situation naturelle où l'horizon induré affleure, les pluies ne peuvent s'infiltrer du fait de sa dureté et de sa compacité. Les pluies ruissellent donc très rapidement, une fois que le très faible microrelief de quelques centimètres de haut, se retrouve saturé. Dans la mesure où ce phénomène apparaît après les premiers millimètres de pluies, cela signifie que plus de 75% des précipitations annuelles vont provoquer un ruissellement, plus ou moins important en fonction de l'intensité et du volume des pluies.

Dans le cas des *tepetates/cangahuas* travaillés, le défonçage crée une très forte porosité lié aux vides formés entre les blocs et fragments de matériaux. Les pluies, même intenses, peuvent alors s'infiltrer immédiatement et profondément. Le macro relief de plusieurs centimètres, voire dizaines de centimètres, diminue considérablement la circulation de l'eau à la surface du nouveau sol.

Toutefois, au fur et à mesure des précipitations, de leurs intensités et du couvert du sol, les *tepetates/cangahuas* cultivés vont progressivement voir des croûtes de battance se former, leur porosité diminuer et leur ruissellement augmenter de façon proportionnelle. L'importance et l'évolution de ces paramètres vont alors dépendre de la résistance à la fragmentation de ces matériaux, du type de travail du sol effectué (à la main, tracteur avec disques...), des apports de matières organiques (compost, fumier, résidus de cultures...), du système de cultures (billons, planches...), de la couverture végétale et des précipitations.

Pour l'érosion et le transport solide, on retrouve les 3 même aspects précédent. A l'état naturel d'affleurement, la dureté et la résistance de ces matériaux font que très peu de sédiments sont arrachés et transportés par l'eau. Leur défonçage et préparation pour leur mise en culture ne changent rien vis-à-vis de l'érosion solide : elle est extrêmement faible. Ce n'est qu'une fois le sol travaillé et cultivé, que les sédiments commencent à être arrachés et transportés par les pluies qui s'infiltreront de moins en moins facilement et qui ruissellent de plus en plus, emportant dans leur élan, les particules instables.

Au final, la mise en culture des *tepetates/cangahuas* revient à gérer le comportement d'un sol limoneux cultivé.

### L'impact des cultures sur les processus érosifs des nouveaux sols.

Les données obtenues aux échelles du profil et de la placette sous pluies simulées, ont permis d'orienter des stratégies visant à réhabiliter les *tepetates/cangahuas* de façon à limiter les risques de dégradation de ces nouveaux sols tout en assurant une productivité importante et rapide. Sur ces bases, des essais ont été menés sur des parcelles de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètre carrés, de 470 à 1 800 m<sup>2</sup>, tant au Mexique qu'en Equateur pendant plusieurs années.

Quelle que soit la taille des parcelles testées de 20 m<sup>2</sup> à près de 2000 m<sup>2</sup> (Arias et al. 1992; Baumann & Werner, 1997; de Noni et al. 2001, Haulon et al., 2007; Podwojewski et al, 2008; Prat et al., 1997; Reyes, 1987; Rivera & Oropeza, 1997) et une méthodologie qui varie quelque peu, le principe est toujours le même : mesurer le ruissellement et les pertes solides et/ou dissoutes pendant plusieurs années en fonction des paramètres du milieu (pentes, sols, biologie..), des cultures et des pratiques culturales, et ce, après chaque événement pluvieux.



Photos 3a. Parcelles d'érosion (1 000 m<sup>2</sup> et 100 m<sup>2</sup>) sur cangahua, Equateur (de Noni) 3b. Parcelle d'érosion avec partiteurs sous la pluie, S.M.Tlaixpán, Mexique (Prat, 1993).

Tab. 8. Caractéristiques des traitements des parcelles à S. M. Tlaixpan, Mexique (Prat et al., 1997)

Traitements	Ref.	Surface m <sup>2</sup>	Materiaux	Prof* m	Pente %	1993	1994	1995	1996
<i>Tepetate</i> non travaillé	Tep.	1 800	<i>Tepetate</i> état naturel	-	2 à 10	-	-	-	-
Défonçage profond	Prof.	470	<i>Tepetate</i> Défoncé	0.60	4.7	B+V	M+S+b	M+S	B+L
Monoculture	Mono.	775	idem	0.46	3.2	B	M	M	B
Fertilisation organique (+minérale en début de culture)	Orga.	730	idem	0.43	3.4	B+V	M+S+b	M+S	B+L
Préparation fine du sol	Prep.	790	idem	0.44	2.5	B+V	M+S+b	M+S	M+S**
<i>Tepetate</i> cultivé de référence	Ref.	1150	idem	0.40	4.4	B+V	M+S+b	-	-
Idem mais réduction taille parcelle en 1994.	"	735	idem	"	"	-	-	M+S	M+S
Sol (vertic Phaeozem)	Sol	715	Sol en place	0.53	5.9	B+V	M+S+b	M+S	B+L

\*Profondeur du défonçage \*\* Billons croisés,

B. Orge, V: Vesce M: Maïs, b : Haricot S : Fève L: Luzerne (Medicago polymorfa)

Tableau 9. Pertes cumulées de sols (Eros. en  $t\ ha^{-1}\ an^{-1}$  en sec) et indice de ruissellement (Kr en %) pour les pluies produisant du ruissellement entre 1993-1996, San Miguel Tlaixpan, Mexique (Prat et al., 1997)

Année	Tep.		Prof.		Mono.		Orga.		Prep.		Réf.		Sol		Culture
	Eros.	Kr	Eros.	Kr	Eros.	Kr	Eros.	Kr	Kr	Eros.	Kr	Eros.	Kr		
1993	9.5	29	4.7	14	2.0	8	1.0	4	0.8	6	0.6	4	0.6	5	Avoine
1994	28.5	49	15.2	31	12.1	33	4.0	17	1.5	14	1.6	14	0.1	1	Maïs
1995	20.9	36	7.5	27	4.2	26	1.5	21	1.0	17	0.3	5	0.0	0	Maïs
1996	17.6	49	10.6	46	8.2	50	1.6	30	0.1*	4*	0.8*	19*	2.6	29	Orge/Maïs
Moyenne 93+96	13.5	40	7.7	34	5.1	33	1.3	16	0.8**	6**	0.6**	4**	1.6	20	Orge
Moyenne 94+95	24.7	43	11.4	29	8.1	30	2.8	18	0.9***	13***	0.9***	14***	0.1	1	Maïs
Moyenne 93 à 96	19.1	42	9.5	31	6.6	31	2.0	17	0.8	11	0.8	11	0.8	12	

\* Essais avec maïs et fève; \*\* Moyenne de 1993; \*\*\* Moyenne de 1994 à 1996

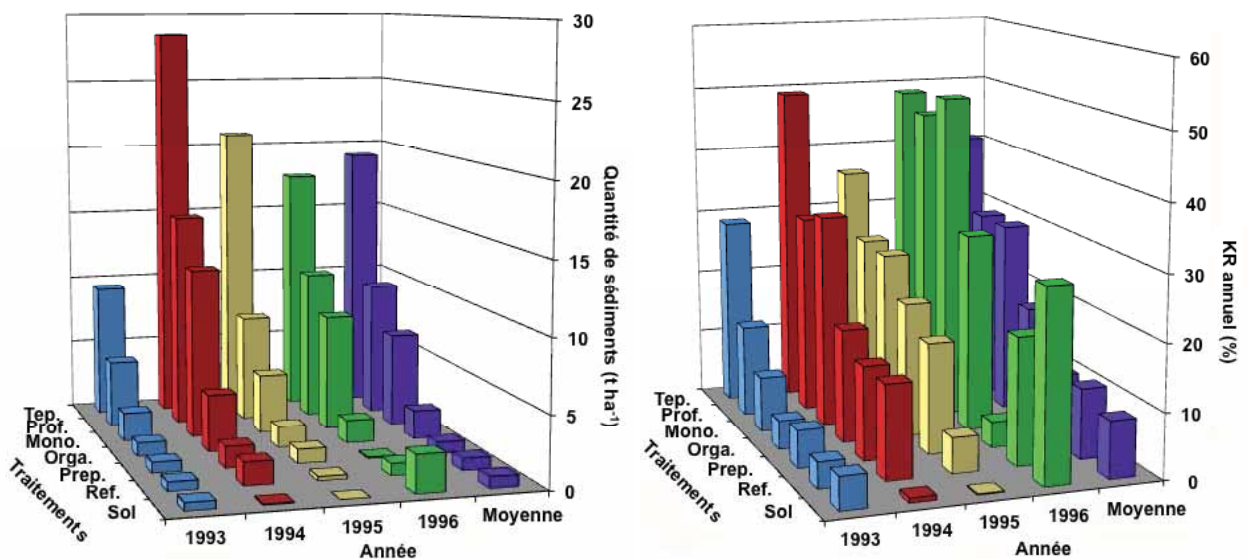


Fig. 2. Pertes annuelles de sol ( $t\ ha^{-1}$ ) et Coefficient de ruissellement moyen (KR) annuel (%) en fonction des traitements testés de 1993 à 1996, S. Miguel Tlaixpán, Mexique (Prat et al. 1997)

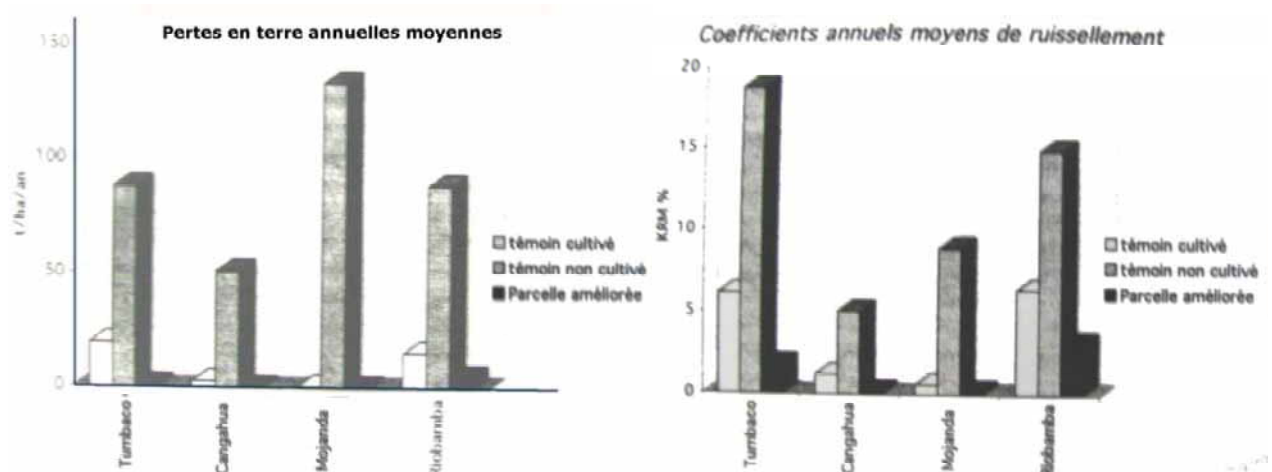


Fig. 3. Pertes cumulées de sols (Eros. en  $t\ ha^{-1}\ an^{-1}$ ) et indice de ruissellement (Kr en %) pour les pluies produisant du ruissellement La Tola, Equateur (de Noni et al., 2001)

Globalement, ces résultats confirment ceux obtenus par les essais de simulation de pluies. Mais il s'en ajoutent également d'autres, tel que le comportement lié à la longueur de pente qui sont apparus au cours de ces essais.

Pour les *tepetates/cangahuas* à l'état naturel, non travaillés, l'infiltration est pratiquement nulle. Mais sous l'effet de la longueur de pente, l'eau de ruissellement se concentre, prend de la vitesse et son énergie lui permet alors d'arracher des particules des matériaux en quantités importantes. En bas de versant cette eau chargée provoque alors une érosion régressive de l'ordre de la dizaine, voire centaine de tonnes/ha. Elle creuse et marque le paysage et entraîne des inondations qui peuvent être catastrophiques car extrêmement rapides et charriant d'énormes volumes d'eau chargée en sédiments.

Le travail du sol, en créant une macro et micro porosité et une rugosité du sol favorise l'infiltration et limite par conséquent le ruissellement et le transport solide. Toutefois, plus le défonçage est profond, et plus le bulldozer va repasser aux mêmes endroits. Avec son poids et les mouvements de la terre, il va écraser les fragments grossiers de *tepetate/cangahuas* ne laissant alors plus qu'un sol fin. Sur ce sol se forment très facilement des croûtes de battance imperméables, il devient donc très fortement érodible. Il faut donc travailler ces matériaux en adaptant profondeur du défonçage, vitesse et nombre de passage de l'engin, à ses caractéristiques mécaniques. A l'inverse, le travail à la main, tel que celui pratiqué en Equateur, maintient une plus forte rugosité du sol, et contribue en cela à générer peu d'érosion. Il a l'inconvénient d'être particulièrement lent et pénible, d'autant que ce sont souvent des femmes qui sont dévolues à ces tâches.

D'un point de vue agronomique, la monoculture traditionnelle sans incorporation de résidus de culture, ce qui est de toute façon impossible la première année de mise en culture de ces matériaux, ne protège pas assez le sol au cours de la saison des pluies, ce qui génère un ruissellement et un transport solide important de plusieurs tonnes à dizaines de tonnes  $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ . Dans le cas de cultures en planches (céréales), la surface plane et compactée, les agrégats fins, l'absence de protection sont les facteurs explicatifs de cette situation. Dans le cas du maïs, le phénomène du « steam-flow » le long des cannes de maïs est important et il favorise la rupture des billons au niveau des pieds des plantes. (Lauffer et al. 1997).

Les cultures associées et/ou ayant de fortes doses d'apports organiques et de résidus de culture, protègent beaucoup plus le sol vis à vis des pluies. Le microrelief rugueux et les multiples résidus en interface sol/air limitent la formation de croûtes de battance, favorisant ainsi l'infiltration de la pluie et donc le transport solide (quelques centaines de kilos à quelques tonnes  $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ ).

### **Structure et matière organique des nouveaux sols.**

Afin de préciser l'impact du travail des *tepetates/cangahuas* sur la stabilité de ces nouveaux sols, deux axes ont été développés en particulier au Mexique. Le premier concerne l'aspect structural et le second porte sur la matière organique.

Le défonçage au bulldozer puis le passage de disques avec un tracteur conduit à briser le tuf induré en morceaux de taille très variable. Sous l'effet de processus biophysico-chimiques, ces fragments vont commencer à s'associer pour créer des agrégats. C'est cet ensemble que l'on qualifie habituellement d'agrégats, or le comportement de fragments est très différent de celui des vrais agrégats d'un point de vue bio-physico-chimique. Dans le premier cas, ils sont très stables physiquement vis à vis de l'eau mais l'absence de liens entre fragments, rend l'ensemble, très fragile en particulier, en cas de ruissellement. De plus, ils ont très peu de réactivité chimique et biologique, ne retiennent pas l'eau et ne servent pas de support aux activités biologiques du sol, contrairement au second. Les tests de stabilités structurales sont à ce titre des indicateurs particulièrement pertinents (Barthes et al., 2000). Ces différences, sont essentiellement dues à la M.O. absente dans un cas et présente dans l'autre (Baéz et al, 2007; Velazquez et al., 2001).

Afin de préciser ces caractéristiques et évolutions, un travail d'enquêtes de terrain avec les paysans couplé à des mesures physico-chimiques sur les sols des parcelles concernées (plus d'une centaine), a permis de dresser une typologie des usages en fonction du temps avec une durée allant de quelques années à parfois près d'un siècle (Baez et al., 2007) (Fig.XX). Pour certains types de gestion des cultures tels que: (a) sans travail du sol, (b) apports fréquents de fumier de bovins, (c) apports fréquents de légumineuses dans la rotation, et (d) substrat à effet de serre, les teneurs en C sont les plus élevées (2 à 4 Mg ha<sup>-1</sup> de C). La vitesse de capture du C est extrêmement rapide au cours des 2 ou 3 premières années de mise en culture, puis croit beaucoup plus lentement ensuite. D'autre part, il ressort que la teneur en C organique est d'autant plus importante que la taille des particules est petite. La plus forte accumulation de C a été ainsi trouvée dans des particules <10 mm et plus particulièrement dans la fraction <0,25 mm. Sachant que les *tepetates* sont pratiquement dépourvus de C, on peut en utilisant les systèmes agricoles adéquates, arriver ainsi à un taux d'accumulation de 2,2 à 4,4 Mg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> de C atmosphérique pour un potentiel de stockage de 88 Mg ha<sup>-1</sup> dans les 20 premiers centimètres de sol dont 15% de ce C stabilisé provient de la glomaline<sup>1</sup> (Baez et al, 2010) et ce, dès les 2 ou 3 premières années de mise en culture.

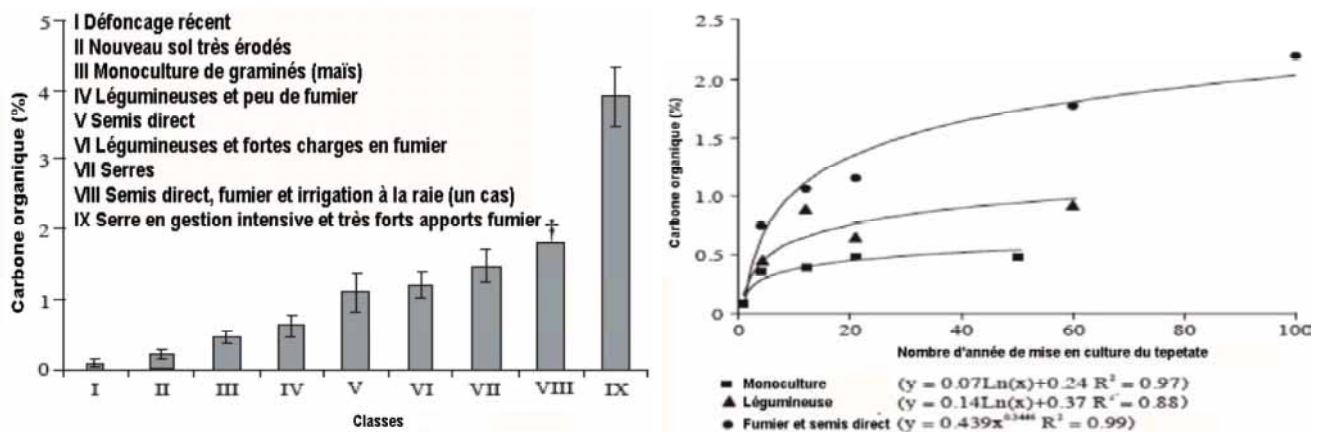


Fig. 4. Teneur en C organique (%) en fonction des types de cultures et des années de culture (Baez et al., 2007)

La proportion entre fragments et agrégats, s'inverse en fonction du temps et des apports en carbone. Là encore, la cinétique est extrêmement rapide les premières années de mise en culture pour être beaucoup plus lente ensuite (Fig. 5)

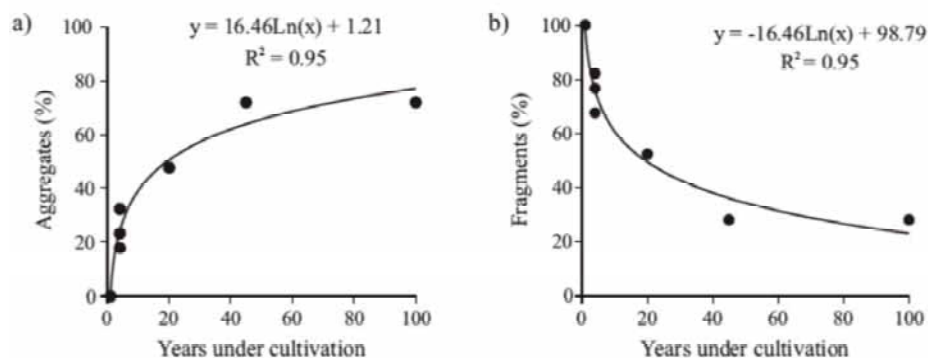


Fig. 5. Evolution de la proportion d'agrégats (a) et de fragments (b) ≥3,36 mm dans un tepetate mis en culture en fonction du temps (Baez et al., 2007)

Bien que ce type d'étude n'ait pas encore été menée avec les *cangahuas*, on peut supposer que les résultats seraient les mêmes puisque ces tufs volcaniques ont la même origine que les *tepetates* et sont donc tout autant dépourvus de carbone.

<sup>1</sup> Glycoprotéine produite par les hyphes de mycorhizes arbusculaires (González-Chávez et al., 2004; Wright y Upadhyaya, 1996) et jouant un rôle protecteur dans la protection et la stabilité des agrégats du sol



### Coûts de mise en culture.

La conversion des *tepetates/canguahas* en terres agricoles productives a un coût élevé si l'on respecte les recommandations issues de nos travaux.

Le coût principal concerne l'utilisation d'un bulldozer suffisamment puissant pour défoncer ces matériaux (double passage, le premier perpendiculaire au second) et effectuer le terrassement. Cela implique de transporter l'engin à destination, de couvrir les frais de main d'œuvre, de combustibles (huile et gazoil) et d'usure. Les travaux devant se faire à vitesse réduite, ce temps a également un prix. Il faut ensuite avoir un tracteur avec des disques qui convertira les gros blocs en fragments. Plus qu'avec le bulldozer, il est fondamental que le passage du tracteur se fasse à une vitesse réduite afin de ne pas créer de la poussière au lieu de fragments. Dans la situation idéale, il faudra prévoir d'apporter et d'appliquer du fumier ou du compost. Dans tous les cas, une fertilisation minérale raisonnée, dont la dose annuelle sera divisée et appliquée en 2 ou 3 fois.



Photos 4a et 4b. Défonçage au bulldozer muni de 3 dents du *tepetate*, S.M. Tlaixpán, Mexique (Prat).



Photos 4c et 4d. Tracteur avec disques. Profil de sol après 6 mois (Maïs) S.M. Tlaixpán, Mexique (Prat)



Photos 4e et 4d. Epandage du fumier de bovin sur le tepetate venant d'être travaillé et production agricole après 4 mois de culture (amarante, vesce, maïs, orge) S.M. Tlaixpán, Mexique (Prat).



Photos 4f et 4g. Production agricole après 5 mois de mises en culture (orge). Formation de croûte de battance après les premières pluies tombées sur sol sec et nu (Fève/maïs/haricot) en 2<sup>e</sup> année de mise en culture du *tepetate* travaillé S.M. Tlaixpán, Mexique (Prat).

En Equateur, un nouveau programme de mise en culture des *canguahas* qui couvrira 60 000 ha, vient d'être lancé en 2011. Avec un bulldozer type Caterpillar D6 équipé de 3 dents qui défoncent ces matériaux à environ 40 cm de profondeur, il faut compter 8 h jour<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> en moyenne pour effectuer le travail. En location dans le secteur privé cela représente une somme d'environ 400 € ha<sup>-1</sup> (contre 600 € ha<sup>-1</sup> au Mexique). Il faut encore rajouter la location d'un tracteur (15 € h<sup>-1</sup>). Il faut environ 4 h pour effectuer 2 passages croisés avec un rotavateur et 2 autres avec une herse et une charrue, soit 60 € ha<sup>-1</sup>. Le coût total tourne donc autour de 600 € ha<sup>-1</sup> en Equateur et de 800 € ha<sup>-1</sup> au Mexique.

Ces chiffres sont à comparer avec le coût de ce même travail fait entièrement à la main : Il faut 100 personnes pour défoncer 1 ha de *canguahua* jour<sup>-1</sup>. Avec un salaire (2011) d'environ 10 € jour<sup>-1</sup> en Equateur (13 € jour<sup>-1</sup> au Mexique), le coût en personnel s'élève donc à 1000 € jour<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> dans ce pays contre 1300 € jour<sup>-1</sup> au Mexique. Il faut en plus rajouter les 60 € ha<sup>-1</sup> pour la préparation finale du sol. Au final, le coût de mise en culture de ces matériaux indurés à la main est beaucoup plus élevé qu'avec un bulldozer. Reste que ce travail extrêmement pénible, peut aussi être une source de revenus pour les communautés les plus pauvres et marginalisées. L'idéal en fait, est d'associer travail mécanique et travail manuel.

Indépendamment des coûts liés aux cultures (graines, engrais, etc...) qui s'ajoutent chaque année, la production espérée en culture pluviale est de 2 à 3 t ha<sup>-1</sup> de maïs et autant pour l'orge ou le blé. Au Mexique, cela revient à recevoir 360 à 540 € ha<sup>-1</sup> pour le maïs et de 480 à 720 € ha<sup>-1</sup> pour l'orge (prix mai 2011). On voit immédiatement que la mise en culture de ces *tepetates/canguahas* n'est pas rentable à court et moyen termes. Dans le cas de cultures à très fortes valeurs ajoutées (arbres fruitiers, magueys/agaves...), il faut attendre entre 5 et 12 ans avant de pouvoir commencer à récolter les fruits de ces travaux. Cette immobilisation de capital, est incompatible avec les ressources dont peuvent disposer les petits paysans de l'altiplano. Ainsi, dans tous les cas, une aide extérieure est indispensable si l'on veut convertir en champs ces matériaux.

**En conclusions, il est possible de convertir des tufs volcaniques indurés, imperméables et stériles en des sols productifs, absorbant l'eau et peu érodables si un certain nombre de règles et de précautions sont suivies**

Les *tepetates/canguahas* sont des tufs volcaniques indurés qui sous l'effet de l'érosion peuvent affleurer. Leur compacité, leur pauvreté physicochimique, la quasi absence de C et de N, empêchent pratiquement le développement de la végétation, même à l'état naturel. Les surfaces affleurantes étant imperméables, elles génèrent de grands volumes d'eau lors du moindre évènement pluvieux. Cette eau, peut alors se révéler dévastatrice en aval, tant sur le milieu que par les dégâts qu'elle peut occasionner sur les habitats situés en bas de pente et en aval de ces milieux montagneux.

Pour éviter ces inondations, destructions et érosion des sols, on peut envisager une mise en culture de ces matériaux, que ce soit de façon manuelle ou mécanique. De plus, la pression anthropique sur ces terres, qui d'ailleurs constituent bien souvent la dernière «frontière agricole interne» des communautés rurales, sont telles que de toute façon, les paysans les mettent en culture. Cette conjonction d'intérêts environnementaux, sociaux et économiques font qu'il y a une pression importante sur ces terres marginales et qu'il est d'autant plus important de suivre quelques précautions pour que ces habilitations agricoles se fassent dans les meilleures conditions possibles.

Il est indispensable, au moment du défonçage, de limiter le travail des *tepetates/canguahas* afin de ne pas créer un sol de granulométrie trop fine, qui serait alors particulièrement susceptible d'être érodé à la première pluie venue et de favoriser au maximum la formation de petits fragments de quelques centimètres. D'autre part, afin de protéger ces derniers, il est indispensable de protéger la surface du sol par un mulch. Enfin, afin de créer de nouveaux agrégats il faut incorporer de fortes doses (minimum  $10 \text{ t h}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ) de matières organiques. Il est préférable d'utiliser du fumier ou du compost, car les matières organiques étant déjà stabilisées, elles permettront une association immédiate avec le support minéral. A défaut, l'incorporation de résidus de culture en fin de cycle, restera une opération indispensable et devra être renouvelée chaque année. On créera ainsi en quelques années, une structure grumeleuse fine résistante aux pluies et sources de nutriments pour les plantes.

Ces nouveaux sols, devront alors être gérés comme des sols à textures limoneuses, c'est à dire se compactant facilement sous l'effet du poids des machines et se destructurant relativement vite sous l'effet de l'énergie des gouttes d'eau. Une couverture morte (mulch) ou vive est donc indispensable pour protéger ces sols, en particulier en début de saison des pluies quand les sols sont dépourvus de végétation et/ou qu'ils viennent d'être travaillés. Une couverture au minimum de 30% du sol permet de réduire drastiquement l'érosion. Le labour minimum est aussi une option souhaitable car il laisse une bonne protection sur le sol et maintient une bonne porosité biologique.

Les *tepetates/canguahas* étant des roches et non des sols, ils sont pratiquement dépourvus de matières organiques telles que le carbone et l'azote. Ce sont donc des matériaux stériles qui, une fois mis en culture, doivent être approvisionnés en éléments nutritifs immédiatement si l'on veut obtenir des rendements agronomiques acceptables pour les paysans qui vont travailler ces nouvelles terres. Lors du premier semis, il est donc difficile de ne pas utiliser des engrais minéraux. Ceux ci doivent être associés à des apports de fertilisation organique sous forme d'apports de fumier, d'engrais vert, de compost etc... dans ces conditions, et si l'on n'utilise pas le maïs les 2 premières années, toutes les autres cultures aboutissent à des rendements dépassant la moyenne régionale dès la première année de mise en culture.

Reste que le coût des investissements et celui des bénéfices obtenus par la vente des récoltes de cultures vivrières reste très en de ça d'un bilan économique positif à moyen terme. Même dans le cas de cultures plus rentables, telles qu'arbres fruitiers, agave pour la production de Mezcal ou de produits pharmaceutiques, il faut plusieurs années avant de pouvoir compter sur un retour d'investissement. Il est donc indispensable qu'une partie des travaux soient pris en charge économiquement par l'état, d'autant que celui ci peut récupérer, via la taxe carbone, des financements internationaux. En effet, les *tepetates/canguahas* constituent des pièges à carbone particulièrement efficaces en terme de taux de séquestration puisque l'on passe de près de 0% à 3-4% en quelques années seulement ! De plus, au delà de l'agriculture, il est possible de reforester ces zones en général dénudées, et donc, là encore, capturer du carbone sous forme de bois. Dans le cadre du réchauffement climatique global, l'habilitation agro-forestière constitue donc des atouts importants qui doivent faire partie des négociations sur ce sujet.

D'autre part, la mise en culture de façon adéquate des *tepetates/canguahas* affleurant va permettre une nouvelle régulation du cycle de l'eau dans ces régions. Grâce à l'infiltration créée dans ces nouveaux sols, les nappes phréatiques vont pouvoir mieux se recharger. Les inondations en aval générées par les eaux qui ne pouvaient pas s'infiltrer dans ces matériaux imperméables à l'état naturel, vont avoir leur nombre diminuer drastiquement. On aboutit ainsi à une mise en protection des biens et des personnes, des améliorations et des économies pour les communautés rurales concernées. Tout ceci représente aussi des coûts qui devraient être pris en considération par les autorités locales et transférés pour financer en partie ou entièrement, des programmes de création de ces nouveaux sols.

La mise en culture des tufs volcaniques indurés et stériles que sont les *tepetates/canguahas*, est possible, relativement facile, productive et durable si l'on suit les quelques règles simples énoncées précédemment. Mais, bien au de là d'un enjeu purement agronomique, la conversion de ces tufs en sols limoneux génèrent une série de bénéfices tant sociaux, qu'économiques et environnementaux depuis l'échelle d'une famille jusqu'à celle de communautés rurales et urbaines. Les états latino-américains concernés devraient donc développer des programmes visant à mettre en culture ces matériaux en apportant des appuis financiers et techniques aux petits paysans, tout en se faisant rembourser ces travaux par des fonds liés au crédit carbone mis en place dans le cadre de la réduction du réchauffement global et par les sommes économisées liées aux destructions évitées.

## Bibliographie

- Alcalá, M. y J. L. Oropeza M., 1998. Potencial hidrológico y la producción de sedimentos de un tepetate de la cuenca del río Los sauces, Michoacán. In: Navarro Garza, Poupon, Pérez Olivera (Eds), Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-CP, Mexico, pp. 145-148.
- Aliphath Fernández, M. & G. Werner, 1994. The tepetate of the central Mexican highlands: prehispanic and modern impact of agriculture and water management. In: 15th world congress of soil science. 2e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos Transactions Commission V: symposia ID 13. Indurated volcanic soils: use and management (Ed.: Etchevers, Aguilar, Núñez, Alcántar, Sánchez), Acapulco, México, 12-16/07/94. AISSS, INEGI, CNA, pp. 528-540.
- Arias Rojo, H. M., M.-E. Miranda M. y D. Gabriels, 1992. Dinámica de la erosión en tepetates roturados. In: 1ero Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda), Mexico, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 370-373.
- Barthès, B., A. Azontondé, Z. Boli, C. Prat and E. Roose, 2000. Field-scale runoff and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). European Journal of Soil Science, Vol 51(3): 485-495.
- Báez Pérez, A., J. D. Etchevers Barra, C. Prat, A. Márquez Ramos y E. Ascencio Zapata, 2007. Manejo agronómico de los tepetates del eje neovolcánico de México. In: Gallardo L., J. F. (Editor), Captura de carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos. Red POCAIBA y Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental, Salamanca, España, pp. 69-84.
- Báez Pérez, A., J. D. Etchevers Barra, C. Prat and C. Hidalgo Moreno, 2007. Formation of aggregates and carbon sequestration in ameliorated tepetates in the Río Texcoco basin, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol 24 (3): 487-497.
- Báez-Pérez, A., M. C. Á. González-Chávez, J. D. Etchevers-Barra, C. Prat y C. Hidalgo-Moreno, 2010. Glomalina y secuestro de carbono en tepetates cultivados / Glomalin and carbon sequestration in cultivated tepetates. Agrocienza, Vol 44 : 517-529.
- Baumann, J. & Werner, G., 1997, Erodibility of volcanic ash soils in the Central Mexican Highlands, in Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos, Quito, Dec. 1996: Quito, Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 343-350.
- Bice, D. C., 1985. Quaternary volcanic stratigraphy of Managua, Nicaragua: correlation and source assignment for multiple overlapping plinian deposit. Geol. Soc. Am. Abstracts, Vol 96: 553-566.
- Campos, A. & D. Dubroeuq, 1990. Formación de tepetates en suelos volcánicos. Terra, Vol 8: 137-147.

- Cangás, J. & G. Trujillo, 1997. Experiencia de recuperación de cangahua en la provincia del Carchi (Ecuador). *in* Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos, Quito, Dec. 1996: Quito, Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 501-505.
- Casanova P., M., O. Seguel S. y W. Luzio L., 2009. Suelos de Chile. Fac. Ciencias Agronómicas, U. de Chile, Santiago de Chile, 367 pp.
- Casenave, A. & C. Valentin, 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Collection didactiques. ORSTOM, Paris, 230 pp.
- Colmet-Daage, F., 1967. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques: 1ere partie. Cah. Orstom, sér. pédologie, Vol 5 (1): 3-38.
- Custode, E., G. De Noni, G. Trujillo y M. Viennot, 1992. La cangahua en el Ecuador: caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión. In: 1e Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda), Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp., 332-346.
- Delgadillo Piñon, M. E., M. E. Miranda Martinez y B. R. Ruiz Hernandez, 1989. Evaluación de seis formas de roturación de tepetate amarillo para incorporarlo a la producción en el oriente de la cuenca de México. Ingeniero agrícola Thesis, UACH, Chapingo, Edomex, 194 pp.
- de Noni, G., P. Pourrut et M. Viennot, 1990. Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Equateur. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, Vol 25 (1-2): 183-197.
- de Noni, G., J.-L. Janeau, C. Prat, G. Trujillo et M. Viennot, 1994. Hydrodynamique, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique Latine (Equateur, Mexique, et Nicaragua): impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole. In: 15th world congress of soil science. 2e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos, Transactions Commission V: symposia ID 13. Indurated volcanic soils: use and management (Ed.: Etchevers, Aguilar, Núñez, Alcántar, Sánchez), Acapulco, México, 12-16/07/94. AISSS, INEGI, CNA, 554-570.
- de Noni, G. et M. Viennot, 1997. Evaluation spatiale et multi-temporelle de la cangahua à partir d'images SPOT. *In*: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos, Quito, Dec. 1996: Quito, Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 138-148.
- de Noni, G., C. Prat, P. Quantin, M. Viennot et C. Zebrowski, 2000. Erosion et conservation après récupération des sols volcaniques indurés de l'Equateur et du Mexique. EGS, Vol 7(1): 25-36.
- de Noni, G., M. Viennot, J. Asseline et G. Trujillo, 2001. Terres d'altitudes, terres de risques. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. Latitudes 23. IRD, Paris, France, 220 pp.
- Etchevers Barra, J. D., R. López, C. Zebrowski y D. Peña, 1992. Características químicas de tepetates de referencias de los estados de México y de Tlaxcala, México. In: 1° Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda), Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 171-177.
- Etchevers Barra, J. D., M. A. Pérez Olivera, H. Brito V., M. Vargas I. y U. López N., 1998. La fertilidad de los tepetates del eje neovolcánico en los estados de México y Tlaxcala. In: Navarro Garza, Poupon, Pérez Olivera (Eds), Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-CP, Mexico, 17-36.
- Faivre, P. et S. Gaviria, 1992. Suelos y formaciones piroclásticas endurecidas en los Andes de Colombia. In: 1° Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias y Miranda), Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 89-99.
- FAO/EC/ISRIC, 2003. World soil resources. Roma, Italy.
- Fedoroff, N., C. M.A., L. A. and K. Oleschko, 1994. Calcitic accretion on indurated volcanic materials (example of tepetates, altiplano, Mexico). In: XV Congreso mundial de ciencias del suelo, Acapulco, México, 12-16 de julio de 1994. 460-473.
- Ferrera-Cerrato, R., 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginados. In: 1e Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda), Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp., 408-418.
- Gondard, P. y H. Mazurek, 2001. 30 años de reformas agrarias y de colonización en Ecuador, Dinámicas territoriales: Ecuador, Bolivia, Perú, Venezuela. Estudios de geografía. CGE, CEN, IRD, PUCE, Quito, Ecuador, pp. 15-40.
- Haulon, M., G. Werner, G. Flores García, A. Vera Reyes and P. Felix-Henningsen, 2007. Assessment of erosion rates during rehabilitation of hardened volcanic soils (tepetates) in Tlaxcala. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol 5(3): 498-509.
- Hidalgo M., C., F. Elsass, P. Quantin et M. Thiry, 1999. Nanoorganisation des argiles et des formes de silice dans des tepetates de type fragipan. In: Structure et ultrastructure des sols et des organismes vivants (Ed.: Elsass, F. et Jaunet, A. M.s), Versailles, France, 20-21/11/97. INRA pp. 121-135.

- IUSS Working Group WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Jongmans, A. G., L. Denaix, F. van Oort and A. Nieuwenhuys, 2000. Induration of C horizons by allophane and imogolite in Costa Rica volcanic soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 64: 254-262.
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y J.-L. Janeau, 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados (Texcoco, México). *In: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos*, Quito, Dec. 1996: Quito, Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 443-456.
- Leroux, Y. y J.-L. Janeau, 1997. Caracterización hidrodinámica de un suelo volcánico endurecido del Ecuador (cangahua), influencia de los estados de superficie. *In: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos*, Quito, Dec. 1996. Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 430-442.
- Navarro Garza, H. & C. Zebrowski, 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetates. *In: 1° Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias y Miranda)*, Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 451-459.
- Navarro Garza, H. y C. Prat, 1996. Habilitación agrícola de los tepetates (suelos volcánicos endurecidos y estériles) de los valles de México y de Tlaxcala. *In: Bovin, P. (Editor), El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas. Economía. CEMCA-ORSTOM, Mexico*, pp. 253-291.
- Nimlos, T. J. y C. Zamora J., 1992. Los suelos endurecidos de Perú. *In: 1° Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda)* Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp. 283-289.
- Peña, D. & C. Zebrowski, 1992. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México) - Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada y anexos : 1. Mapas temáticos; 2. Descripción de perfiles; 3. Resultados de análisis-. Informe final. ORSTOM-Paris, CP-Montecillo, J. Liebig Universitat-Giessen, UAT-Tlaxcala, 98 pp.
- Pimentel Bribiesca, L., 1992. Como hacer productivos a los tepetates en México. *In: 1° Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias y Miranda)*, Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 293-301.
- Podwojewski, P. & N. Germain, 2005. Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, Vol 39, 39-51.
- Podwojewski, P., J.-L. Janeau and Y. Leroux, 2008. Effects of agricultural practices on the hydrodynamics of a deep tilled hardened volcanic ash-soil (Cangahua) in Ecuador. *Catena*, Vol 72, 179-190.
- Prat, C., A. Báez Pérez y A. Márquez Ramos, 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetates t3, Texcoco, México. *In: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos*, Quito, Dec. 1996: Quito, Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 371-383.
- Prat, C. & P. Quantin, 1992. Origen y génesis del talpetate, horizonte volcánico endurecido de los suelos volcánicos de la región Centro Pacífico de Nicaragua. *In: 1e Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda)*, Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp., 267-282.
- Prat, C. & P. Quantin, 1994. The talpetate of the Central-Pacific region of Nicaragua: a palagonitized tuff from the Masaya volcano. *In: 15th World Congress of Soil Science, 10-16/07/94, Acapulco, Mexico, ISSS, International Soil Science Society and Mexican Society of Soil Science*. 497-506.
- Prat, C., B.-T. Ly, I. Lepigeon, G. Faugère y J.L. Alexandre, 1997. Los sistemas agropecuarios de producción en tepetates, en cuatro comunidades del altiplano mexicano. *In: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos*, Quito, Dec. 1996. Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 482-491.
- Prat, C., 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en el área experimental de San Miguel Tlaixpán (Texcoco, México). *In: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. Suelos volcánicos endurecidos*, Quito, Dec. 1996: Quito, Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 359-370.
- Quantin, P., C. Zebrowski, M. Delaune y C. Hidalgo, 1992. El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): ¿Loess o volcanic ash tuff? *In: 1° Symp. int. Suelos volcánicos endurecidos (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda)*, Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 178-182.
- Quantin, P., H. Arias, J. D. Etchevers, R. Ferrera, K. Oleschko, H. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski, 1993. Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura (Informe científico final del proyecto: NTS2-A-212-C CEE/ORSTOM. Terra Vol 11, N° espec., 72 pp.
- Quantin, P., 1997. Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique latine (Chili, Equateur, Mexique). Rapport scientifique final. Contrat UE/ORSTOM-U.J.L. Giessen n° TS3\*CT 930252, pp. 178.

- Rey Contreras, J. A., 1987. Estimación de la erodibilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K. In: Ruiz Figueroa, J. F. (Editor), *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. UACH, Mexico, Chapingo, Mexico, pp. 78-84.
- Rivera R., P. & J. L. Oropeza M., 1997. Evaluación del potencial hidrológico y de la producción de sedimentos en tepetates tipo t3 con lluvia simulada. In: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3e symp. int. *Suelos volcánicos endurecidos*, Quito, Dec. 1996. Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 412-419.
- Roose, E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et Documents ORSTOM n° 78*, ORSTOM, Paris, 108 pp.
- Sánchez Juárez, M., J. F. Ruíz Figueroa et E. Cautle Fabián, 1987. Comportamiento de dos tipos de tepetates bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. In: Ruiz Figueroa, J. F. (Editor), *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. UACH, Mexico, Chapingo, Mexico, pp. 78-84.
- Sedov, S., E. Solleiro Rebolledo and J. Gama Castro, 2003. Andosol to Luvisol evolution in central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *Catena*, Vol 54 (3): 495-513.
- Servenay, A. & C. Prat, 2003. Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma*, Vol:(3-4): 367-375.
- Siméon, R., 1887. *Diccionario de la lengua Nahuatl o mexicana*. Siglo XXI, México, D.F.
- USDA-NRCS, 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, Eleventh Edition. United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., USA, 347 pp.
- Velázquez Rodríguez, A., D. Flores Román y O. Acevedo Sandoval, 2001. Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales/Aggregate formation in tepetate by effect of plant species. *Agrociencia*, Vol 35 (3): 311-320.
- Werner, G., G. Miehlisch, A. Lückoff und 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 pp.
- Williams, B. J., 1992. Tepetate in 16th century and contemporary folk terminology valley of Mexico. In: 1<sup>o</sup> Symp. int. *Suelos volcánicos endurecidos* (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda), Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 355-369.
- Winckell, A. & C. Zebrowski, 1992. La cangahua en Equateur : le contexte paléo-géographique de sa formation. In: 1<sup>o</sup> Symp. int. *Suelos volcánicos endurecidos* (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda), Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, 107-112.
- Zebrowski, C., 1992. Los suelos endurecidos en America Latina. In : 1<sup>o</sup> Symp. int. *Suelos volcánicos endurecidos*, (Ed.: Zebrowski, Prat, Etchevers, Arias, Miranda), Mexique, oct 1991, Terra Vol 10 N° sp, Vol: 15-23.
- Zebrowski, C., 1997. Los suelos con cangahua en el Ecuador. In: Zebrowski, Quantin, Trujillo, (eds.), 3<sup>o</sup> symp. int. *Suelos volcánicos endurecidos*, Quito, Dec. 1996. Ecuador, UE, ORSTOM, PUCE, UCE, 128-137.



Ambassade de France en Haïti

# Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles

Editeurs scientifiques

Eric ROOSE, Hervé DUCHAUFOUR et Georges DE NONI

avec le soutien de

l'Université d'État d'Haïti

l'Université de Quisqueya

le SCAC de l'Ambassade de France en Haïti

l'Institut de recherche pour le développement (IRD)

IRD EDITIONS

Marseille, 2012

© IRD, 2012

ISBN : 978-2-7099-1728-5