

Scientific registration n° : 915  
Symposium n° : 38  
Presentation : poster

## **Sustainable reclamation of indurated volcanic soils in Latin America. Réhabilitation durable de sols volcaniques indurés d'Amérique Latine.**

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

(1) ORSTOM, 32 Avenue H. Varagnat, 93143, Bondy cedex, France.

(2) ORSTOM LCSC, 911 Av. Agropolis, 34032 Montpellier cedex 01, France.

The aim of this study is the soil reclamation of some indurated materials of volcanic soils, which cover large areas after soil erosion. This paper will present successively: the characteristics of these indurated materials, their genesis and their cartography; the physical, chemical and microbiological factors of a potential fertility; an analysis of their evolution under soil cultivation; the results of agronomical experiments of their crop productivity; a socio-economical analysis of conditions of their management and finally, the results of runoff and soil loss measurements according to various agricultural treatments. This work show clearly that it's possible to create a new soil from the indurated and sterile volcanic tuff which appears on large surface in Latin America, due mainly to a bad management of this lands. The productivity of this new soils, with a good soil preparation, protection and control of soil erosion as well as a good fertilisation (mineral and/or organic and/or inoculation of microorganismes) could be higher than the production on soil since the first year of culture. In spite that the investissment required for all this works, can be refund in 8 years, it's usually imposible for a paesant of this countries to have a such quantity of money for this. That's why it is necessary for this countries to developped a strategy (credits, loans of the engines...) to help the people to create new productive soils.

Key words: Agricultural reclamation, indurated volcanic soils, Latin America.

Mots-clés: Réhabilitation agricole, sols volcaniques indurés, Amérique Latine.

Scientific registration n° : 915

Symposium n° : 38

Presentation : poster

## **Sustainable reclamation of indurated volcanic soils in Latin America.**

### **Réhabilitation durable de sols volcaniques indurés d'Amérique Latine.**

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

(1) ORSTOM, 32 Avenue H. Varagnat, 93143, Bondy cedex, France.

(2) ORSTOM LCSC, 911 Av. Agropolis, 34032 Montpellier cedex 01, France.

#### **INTRODUCTION**

En Amérique Latine, l'érosion causée par l'Homme a mis à nu de larges surfaces de sols volcaniques indurés et stériles, localement appelés "tepetates" au Mexique ou "cangahua" en Équateur. Faute d'autres ressources en terre, la réhabilitation en sol agricole de ces matériaux indurés est une des possibilités qui permettrait d'aider à la survie des petits paysans qui représentent près de 80% de la population rurale. C'est pourquoi, l'étude des conditions d'une réhabilitation durable fut l'objectif de deux programmes coordonnés par l'ORSTOM et cofinancés par l'Union Européenne de 1989 à 1996.

#### **OBJECTIFS**

Au Mexique et en Équateur, nous nous sommes fixés cinq objectifs majeurs: 1- La caractérisation, genèse et cartographie des horizons indurés de sols volcaniques, leurs propriétés et leur extension sous l'effet de l'érosion agricole, 2- L'étude des facteurs de fertilité potentielle (physiques, chimiques, matière organique et azote, activité microbienne et micro-organismes symbiotiques) des horizons indurés et leur évolution sous culture, 3- La recherche d'une productivité agronomiquement et économiquement durable à travers des expérimentations agronomiques (essais de fertilisation minérale ou organique et de microorganismes sym-biotiques, rotation de plantes et façons culturales adaptées), 4- L'analyse socio-économique de la réhabilitation agricole des sols indurés et l'étude des systèmes économiques familiaux, des coûts et de la rentabilité, 5- L'étude de l'érodibilité et la conservation des sols indurés cultivés; l'impact de diverses cultures et travaux de conservation; l'observation du fonctionnement hydrique des tepetates naturels et cultivés, de la réserve en eau et des transferts d'éléments.

#### **RÉSULTATS MAJEURS**

##### **1- Caractérisation, genèse et cartographie**

###### *1.1. Localisation, caractérisation et genèse*

En Équateur et au Mexique, les affleurements d'horizons indurés (cangahua, tepetates...) apparaissent sur les piémonts des sierras volcaniques récentes, en régime

climatique subhumide ou subaride. Ces matériaux indurés proviennent de l'altération à la base d'un sol, d'une couche de cendre volcanique consolidée (tuf). Sous le sol actuel, on observe une succession de deux à plusieurs paléosols à horizon induré qui proviennent de deux ou plusieurs éruptions volcaniques antérieures, datant de 12 000 à plus de 22 000 ans BP au Mexique et de près de 14 000 à près de 30 000 ans en Équateur.

Les constituants minéraux argileux et les propriétés des horizons indurés varient progressivement selon une séquence pédoclimatique de l'amont subhumide à l'aval subaride. En amont, le tuf est friable et altéré en halloysite. Progressivement vers l'aval s'accroît la proportion de smectites et de silice non cristalline. Le tuf altéré acquiert des propriétés de "fragipan": friable et plastique à l'état humide et dur à l'état sec. En aval, les smectites prédominent et le tuf altéré s'enrichit en calcaire et en opale formant un "duripan pétrocalcique" toujours très dur. Dans le tepetate "fragipan", l'arrangement compact face à face des argiles assure la forte cohésion de ce matériau à l'état sec et un revêtement diffus de gels de silice pourrait également participer à ce phénomène (Hidalgo, 1995). Les horizons indurés s'étagent en altitude de 2 300 à 2 800 m autour des vallées de Mexico et de Tlaxcala dans le centre du Mexique et de 2 400 à 3 200 m dans la vallée interandine d'Équateur. Nos expérimentations ont été réalisées au Mexique sur un tepetate "fragipan" à 2 500 m d'altitude, et en Équateur sur une cangahua de type "duripan" faiblement calcaire à 2 500 m (La Tola) et 2 800 m (Cangahua) d'altitude.

### ***1.2. Cartographie, extension des affleurements de sols indurés.***

Dans les régions de Tlaxcala et de Mexico au Mexique, les sols à tepetates occupent de 40 à 60% de la superficie totale dont un tiers (soit 12 à 20% de la superficie) présente des tepetates affleurants du fait de l'érosion (Peña et Zebrowski, 1992; Werner, 1992).

Une étude (Servenay, 1996) réalisée à partir de traitements d'images Landsat correspondant à des zones cartographiées ou non par des pédologues, associé à un SIG du milieu naturel (géologie, sols, pluviométrie, altitude, forêt, zones irriguées et urbaines) confirme la présence des tepetates sur les zones de piedmont des systèmes montagneux. La précision des pixels (30x30m) permet une meilleure localisation et comptage des surfaces de tepetates que les cartes pédologiques existantes.

En Équateur, la carte des sols à cangahua de la vallée interandine a été actualisée (Zebrowski, 1996). Leur superficie d'environ 2 400 km<sup>2</sup> représente 37% des terres cultivées du piedmont. La comparaison entre photos aériennes montre un accroissement en 30 ans (1966-1996) de plus de 300% des affleurements de cangahua du fait de l'érosion agricole. Une analyse d'images SPOT datées de 1986 et 1995, a permis une autre évaluation des surfaces en cangahua "continue" et "discontinue" (Servenay, 1995; Faure, 1996). Elle révèle dans la région de Quito, une extension rapide en l'espace de dix ans des surfaces en cangahua continue (+ 200%) et discontinue (+ 100%).

Il y a donc un grave danger de désertification de ces régions et un urgent besoin de réhabiliter les sols indurés pour pallier les besoins en sols agricoles et forestiers.

## **2-Facteurs de fertilité potentielle des sols indurés cultivés.**

### ***2.1. Facteurs initiaux.***

Certains facteurs sont limitants, d'autres favorables.

Les facteurs limitants sont: -1 La compacité et dureté, macroporosité et perméabilité très réduites qui empêchent la pénétration de l'eau, de l'air et des racines; 2- La carence en matière organique, azote et phosphore assimilable, et éventuellement une alcalinité (pH >8); 3- La stérilité biologique et des carences en bactéries fixatrices d'azote et en

mycorhizes qui faciliteraient l'assimilation du phosphore; 4- La carence d'humus nécessaire à l'activité microbienne et améliorant les propriétés du sol.

Les facteurs favorables sont: la présence d'argiles à forte activité de surface qui assurent une bonne rétention de l'eau et des nutriments ainsi que la cohésion et la stabilité des agrégats; l'abondance de Ca, Mg et K échangeables et de certains micro-éléments utiles à la plante; la non fixation irréversible du phosphore soluble ajouté au sol.

Après fragmentation en agrégats de taille "optimum" (2 à 5 mm de diamètre) et une correction des carences en N et P, la cangahua et le tepetate ont une bonne fertilité potentielle. Nous l'avons vérifié par des essais en vase de végétation et au champ. Cette potentialité peut-être accrue par une fumure organique qui réduit l'alcalinité, apporte aussi N et P, favorise l'activité microbienne et améliore les propriétés physiques.

### **2.2. Amélioration et évolution des facteurs de fertilité.**

Nous avons étudié sur le terrain et au laboratoire (Etchevers et al., 1996) si l'amélioration du potentiel de fertilité du tepetate cultivé était fonction du nombre d'années de culture et du développement du stock d'humus, d'azote "labile" et de phosphore "assimilable".

Nous avons observé des parcelles cultivées sur tepetate en milieu paysan de 1 à 60 ans . Les apports organiques et minéraux ont un effet immédiat sur l'état nutritionnel et la productivité. Contrairement à notre hypothèse initiale, il n'y a pas d'amélioration proportionnelle au nombre d'années de culture. Ceci est dû à l'irrégularité et à l'insuffisance des apports en agriculture traditionnelle. Il n'y a pas d'effets résiduels des cultures à moyen ou à long terme dans la mesure où le retour des résidus de récolte, bien que notable, soit trop faible. De même en laboratoire, nous avons constaté sur des échantillons de ces parcelles que la dynamique de la matière organique, de l'azote et de l'activité microbienne n'est pas non plus fonction de l'âge des parcelles. Toutefois, il y a bien une corrélation entre l'accroissement du stock de matière organique et celui de l'azote "minéralisable" en "labile" et de l'activité microbienne.

Nous avons expérimenté l'inoculation de micro-organismes symbiotiques, au champ et au laboratoire (Ferrera et al., 1996). L'inoculation de souches spécifiques de *Rhizobium* sur diverses légumineuses a montré la nécessité d'une fumure organique pour être efficace. Mais l'inoculation d'*Azospirillum* sur le maïs a été toujours sans effet. L'inoculation d'endomycorhizes du genre *Glomus* a été positive avec amendements organiques avec l'oignon et *Eysenhardtia polystachya* mais pas avec le maïs. Peut-être faudrait-il rechercher une variété spécifique de *Glomus* pour le maïs.

## **3- Expérimentation agronomique et productivité**

Les aléas climatiques accusent de fortes variations interannuelles et rendent délicates les comparaisons d'une année sur l'autre dans la mesure où ils influencent considérablement le développement des plantes.

### **3.1. Au Mexique, sur tepetate.**

Nous avons expérimenté sur 5 années des pratiques traditionnelles et des méthodes nouvelles afin d'accroître la productivité et la rentabilité (Baez et al., 1996; Etchevers et al., 1996; Fechter et al., 1996; Ferrera-Cerrato et al., 1996; Navarro et al., 1996; ).

- Efficacité de la fumure organique ou minérale et de l'inoculation de symbiotes.

L'expérimentation a été faite sur l'avoine en première année, sur maïs et fève associés en 2<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> années. Des essais complémentaires ont porté sur le mélilot blanc, la vesce, le pois-chiche, le *Medicago polymorpha*, l'oignon, le *Leucaena l.*, et l'*Acacia c.*

L'efficacité des fumures organiques ou minérales est quasiment équivalente mais le fumier est plus difficile à trouver, à transporter et à épandre et donc plus coûteux. Il est indispensable de répartir les engrais minéraux en 2 ou 3 applications au cours de la culture. La combinaison organique et minérale à dose "starter" est plus productive car elle compense le déséquilibre N/P, favorise l'activité microbienne et pallie la concurrence initiale entre plante et micro-organismes.

L'inoculation de *Rhizobium* à la légumineuse associée n'est efficace qu'avec une fumure organique modérée. En outre, l'association graminée-légumineuse (orge-luzerne, maïs-fève) est plus productive que la monoculture. Donc l'alternative optimum serait la culture associée graminée-légumineuse avec inoculation de *Rhizobium* et une fumure organique à dose modérée et minérale à dose "starter", doses qui doivent être renouvelées à chaque culture.

- Nombre d'années de culture.

Pour la plupart des plantes testées, la productivité n'augmente pas en fonction du nombre d'années de mise en culture. Le maïs fait exception puisque le rendement en grain est très faible en 1<sup>ère</sup> année, moyen la 2<sup>ème</sup> année et normal à partir de la 3<sup>ème</sup> année. La fertilisation doit être renouvelée à un niveau suffisant car l'effet résiduel est limité.

- Précédent cultural.

Le précédent d'une culture associée maïs-fève sur l'orge ou le blé est meilleur que celui de l'orge ou blé car il y a un effet résiduel en N de la légumineuse.

- Fertilisation traditionnelle (organique ou minérale) à dose modérée.

Ce type de fertilisation, sans être optimum peut-être rentable pour le blé, l'orge, l'avoine, la fève ou le haricot, mais pas pour le maïs grain car cette plante a besoin de disposer d'une dose suffisante de N et P pour obtenir une bonne efficacité reproductive.

- Pratiques culturales pour le maïs.

Le labour "minimum" sans buttage est moins productif que le labour "traditionnel" (avec buttage) à cause de l'aptitude à la verse des variétés locales utilisées. Un labour initial à 40 cm de profondeur est suffisant. En année pluviométrique normale, un billon cloisonné n'est pas plus productif qu'un billon simple sauf pour la fève associée. Reste à vérifier en année sèche, l'impact sur les cultures de ce traitement qui retient bien l'eau et favorise la recharge de la réserve en eau du sol.

### **3.2. En Équateur, sur cangahua.**

L'expérimentation a été simplifiée et n'a duré que 2 ans (Trujillo et al., 1996). Nous avons comparé 2 stations en climat subhumide ou subaride et expérimenté une irrigation d'appoint pour avancer le cycle cultural en climat subaride et compléter la ressource en eau. La fumure organique a été comparée à la fertilisation minérale, à des doses optimum.

Le maïs produit mieux en 1<sup>ère</sup> année en climat subaride avec fumure organique et irrigation qu'en climat subhumide quelle que soit la fertilisation. S'agit-il d'un effet climatique ou variétal? Dans les deux cas, l'orge et l'avoine sont également productifs avec fumure organique ou minérale dès la 1<sup>ère</sup> année. Un essai en communauté paysanne (Licto) a confirmé que l'orge est assez productif dans des conditions modérément coûteuses de préparation semi-grossière du sol et de fertilisation organique ou minérale.

### **4-Analyse socio-économique de la réhabilitation agricole.**

L'étude a été faite sous forme d'enquêtes dans plusieurs communautés rurales d'Équateur et du Mexique cultivant des sols à cangahua ou à tepetate. Il y a eu aussi une

enquête régionale dans toute la vallée interandine d'Équateur. L'analyse a été faite par unité de production et par type de système économique familial. Le but était d'évaluer l'intérêt des sols volcaniques indurés comme ressource en sol et d'analyser la problématique de leur utilisation agricole.

Dans les deux pays, il s'agit de régions très peuplées, d'exploitation traditionnelle qui assure seulement la survie des populations. C'est le domaine du minifundisme. En Équateur en terre de cangahua, plus de 80% des familles possèdent moins de 3 ha. Au Mexique en terres à tepetate, la proportion varie d'une région à l'autre: si un tiers des familles possède entre 5 et 10 ha, la majorité n'en cultive que quelques hectares. Les cangahuas et les tepetates affleurants pourraient donc être une ressource en nouveau sol. La culture de base pour l'autosubsistance est le maïs. Il y a peu de place pour les cultures de rentes et l'élevage bien que le nombre d'animaux ne cessent de s'accroître. Les moyens très limités sont souvent réduits au capital humain. Les paysans sont souvent illettrés et leurs connaissances techniques, insuffisantes. Des ressources monétaires du travail salarié extérieur (migration villes ou émigration vers les USA) sont nécessaires (Zebrowski, 1996; Muñoz y Navarro, 1996; Navarro y Prat, 1996).

L'habilitation agricole en sol de la cangahua ou du tepetate implique d'importants travaux et investissements financiers. Cependant, les paysans sont amenés à le faire eux-mêmes par nécessité. Malheureusement, au lieu d'appliquer de fortes doses d'engrais, ils se contentent trop souvent de doses utilisées pour des sols "normaux". Ainsi le rendement en maïs en grains n'est que de 500 kg/ha en Équateur alors qu'au Mexique, avec une meilleure fertilisation et une sélection variétale locale, il produit 3 à 4 fois plus. En Équateur, le défonçage de la cangahua est le plus souvent manuel et très coûteux en temps de travail. Au Mexique, le défonçage du tepetate est mécanisé, méthode moins coûteuse et plus efficace pour la préparation du sol et des terrasses... dans la mesure où des engins lourds sont disponibles. Cette méthode commence à se développer en Équateur, sous forme de terrasses en pente réduite avec muret de cangahua à l'aval dont le coût varie entre 850 et 1050 US\$/ha. Au Mexique, avec une fertilisation adéquate, on estime que ces ouvrages peuvent être rentabilisés entre 6 et 8 années de production normale. Le développement des travaux de réhabilitation agricole nécessite donc un programme d'aide financière et de formation des agriculteurs.

## **5-Erodibilité, fonctionnement hydrique et conservation des sols.**

L'étude a consisté à mesurer l'érosivité des pluies ainsi que le ruissellement et la perte en terre en fonction de différents aménagements sous pluies naturelles ou simulées (de Noni et al., 1996; Fechter et al., 1996, Oropeza et al., 1996; Prat et al., 1996). L'expérimentation a duré de 4 à 6 ans au Mexique et 2 ans en Équateur.

### **5.1. Régime des pluies et érosivité.**

Dans tous les cas, le régime des pluies est de type ustic, tropical de montagne (isomesic); la saison sèche dure de 4 à 6 mois. La hauteur moyenne annuelle des pluies est de 400 à 800 mm. Le coefficient d'érosivité moyen annuel (Rus) varie de 100 à 300, valeur plutôt modérée. Il existe une grande variabilité stationnelle (Rus = 100 à plus de 300 au Mexique, de 100 à plus de 200 en Équateur) et interannuelle (de 1 à 3 environ). Celle-ci est corrélative du nombre de pluies fortement érosives qui varient de 2 à 6/an au Mexique et de 2 à 4 en Équateur. Ces pluies exceptionnelles produisent au moins la moitié de l'érosion totale annuelle alors que 80% des pluies ne sont pas érosives.

### **5.2. Ruissellement et érosion sur parcelles Wischmeier (pente 5-6%) au Mexique.**

Les valeurs moyennes annuelles de ruissellement, Kr (en % des pluies mesurées) et de perte en terre, E (en kg/ha/an), sont les suivantes: sur tepetate naturel nu: 32 à 35% et 15 à 20 t/ha/an; cultivé nu: 27 à 33% et 23 à 48 t/ha/an; cultivé en blé (labour à plat): 15% et 2 à 3 t/ha/an; cultivé en maïs (buttage en billon): 1 à 12% et 1 t/ha/an.

### **5.3. Ruissellement et érosion sur terrasses "paysannes" (de 500 à plus de 1000 m<sup>2</sup>, pente 3-6%) au Mexique.**

Les valeurs moyennes de Kr et E sont les suivantes:

- Tepetate naturel nu: 48% et 18 t/ha/an, avec un Kr maximum annuel de 50% et en forte pluie de 80%; E maximum annuel de 30 t/ha.

- Sur les terrasses cultivées il y a une forte variation interannuelle entre année "sèche" exceptionnelle et année "pluvieuse" normale.

Cultures	Année	Kr (%)	E (t/ha/an)		
Orge Monoculture	Sèche	8 à 13	1 à 6		
	Pluvieuse	50 à 53	11 à 30		
	Association	Sèche	3 à 5	0,6 à 1,3	
		Pluvieuse	4 à 30	1 à 1,6	
Maïs Monoculture	Pluvieuse	29 à 31	4 à 15		
	Association	Pluvieuse	5 à 13	1 à 15	
		Association + Billons simples	Pluvieuse	30	5
		Association + Billons croisés	Pluvieuse	18	0,8
Maïs Labour traditionnel avec buttage (95-96)		9	4		
	Labour minimum à plat avec couverture intercalaire	5	2		
Tlaxcala Labour minimum à plat sans couverture intercalaire		19	6		

Il y a également un effet très marqué du type de labour en culture de maïs ainsi qu'entre monocultures (très érosives) et cultures associées (peu érosives). Le labour minimum à plat avec végétation intercalaire est aussi efficace que le labour traditionnel en billon, mais la rupture de billons en cas de forte pluie peut accroître fortement l'érosion. Le billonnage cloisonné limite ces ruptures.

### **5.4. Ruissellement et érosion sur petites terrasses (100 m<sup>2</sup>) en Équateur.**

D'une longueur de 10 m, trois parcelles présentent une pente de 15%: P1 témoin, P2 avec muret filtrant de cangahua en aval, P3 avec préculture irriguée et une parcelle, P4 est plane (pente de 2%). Toutes sont cultivées en avoine, sans engrais. Deux stations ont été testées: la Tola en régime subhumide (750 mm) et Cangahua en subaride (550 mm). L'année 1995-1996 a été particulièrement humide (1050 mm à La Tola et 676 mm à Cangahua). Les résultats moyens (1994-1996) de Kr et E sont les suivants:

	P 1		P 2		P 3		P 4	
	Kr	E	Kr	E	Kr	E	Kr	E
La Tola	1.9	17.7	3.2	6.1	2.0	0.8	3.3	5.7
Cangahua	1.3	2.1	0.9	1.1	0.9	0.6	-	-

L'érosion de la cangahua cultivée à nu, peut dépasser 100 t/ha/an (De Noni et al., 1993).

L'érosion est considérablement réduite sous l'effet d'une préculture irriguée qui protège le sol au début de la saison des pluies. Le muret filtrant en bas de parcelle est aussi efficace qu'une terrasse plane. Une culture avec engrais et irrigation, couvrant mieux le sol, pourrait réduire encore plus efficacement l'érosion. En climat subaride, l'érosion est plus faible qu'en climat subhumide. Une expérimentation sous pluie simulée

a montré que la rugosité d'une texture "grossière" accroît l'infiltration et réduit fortement l'érosion. Le facteur pente est moins important que la texture. Donc trois facteurs sont à prendre en compte: la préparation du sol, le muret filtrant en aval et la préculture irriguée.

## CONCLUSIONS

Les horizons indurés de sols volcaniques d'Amérique Latine affleurent sur les piémonts du fait du développement récent d'une agriculture intensive mal gérée et d'un élevage mal contrôlé. Ce risque peut-être réduit et la ressource en sol restaurée. Ces matériaux indurés sont stériles, mais ils présentent une certaine fertilité potentielle. Ils peuvent être habilités en sol agricole après une fragmentation adéquate, une compensation des carences en azote et phosphore (et éventuellement de l'alcalinité), une activation de la vie microbienne par une combinaison de fertilisation organique et minérale à dose modérée (voire même par inoculation de micro-organismes symbiotiques). Ainsi, une culture associée graminée-légumineuse est rentable et améliorante, dans la mesure où l'on n'oublie pas la sélection des plantes et quelques modifications des façons culturales. Il est également important de prévoir une gestion des fourrages et des zones de parcours. De plus, la variation de la pluviométrie étant très forte, il serait également utile dans la mesure du possible, de préconiser une irrigation d'appoint pour avancer les cultures et/ou en période de sécheresse, ce qui permettrait de réduire les risques d'érosion grâce à une couverture des sols, et améliorerait la productivité (assure précocité et meilleure levée, réduit le risque de gelée précoce, régularise la croissance des plantes, en particulier celle du maïs qui est particulièrement sensible au stress hydrique). Une agriculture bien conduite est le plus sûr garant d'une bonne conservation des sols et de la rentabilité des investissements. La réhabilitation des sols volcaniques indurés étant une ressource en sol pouvant contribuer à aider à la survie des petits paysans qui représentent 80% de la population rurale, son coût devrait faire l'objet d'un plan prioritaire d'aide au développement agricole et doit être accompagné d'un programme de formation des paysans.

## RÉFÉRENCES

- Báez, A., Ascencio, E., Prat, C. y Márquez, A. 1996. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal. Texcoco, México. *In*: Zebrowski et al. (Eds), Suelos volcánicos endurecidos, III Simposio Internacional (Quito, 12/1996), UE-ORSTOM-PUCE-UC, Quito, Equateur. pp. 296-310.
- De Noni, G., Viennot, M. et Trujillo, G. 1993. Mesure de l'érosion dans les Andes de l'Equateur. *Cah. ORSTOM, sér. pédologie*, XXV, 1-2:183-196.
- De Noni, G., Viennot M., Trujillo G. y Custode E. 1996. Ruissellement et érosion sur des parcelles de cangahua réhabilitée (période 1994-1996). *In*: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 331-342.
- Etchevers, J. y Brito, H. 1996. Levantamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala. *In*: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 202-212.
- Etchevers, J., Pérez, A. y Navarro, H. 1996. Dinámica de la materia orgánica y el N en los tepetates habilitados para la producción agrícola. *In*: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 213-223.
- Faure, J-F. 1996. Spatialisation de la cangahua en Equateur à partir de données SPOT: cas du bassin de Quito (Equateur). mem. maîtrise, Univ. Paris VI, France. 61 p.



- Fechter-Escamilla, U., Tehózol, F. y Muñoz, P. 1996. Maíz bajo labranza reducida en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) rehabilitado en Tlaxcala, México. Efectos a crecimiento y rendimiento. *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 317-324.*
- Fechter-Escamilla, U., Vera, A. y Werner, G. 1996. Erosión hídrica sobre un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque de Tlaxcala, México. *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 351-358.*
- Ferrera-Cerrato, R., Ortiz, A., Delgadillo, J. y Santamaría, S. 1996. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia sobre los microorganismos. *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 325-337.*
- Hidalgo, C. 1995. Etudes d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques de la vallée de Mexico. Thèse Univ. Nancy I., France. 215 p. (ORSTOM, TDM # 146, 1996)
- Muñoz S. y Navarro, H. 1996. Uso de recurso, rentabilidad y sustentabilidad en los Sistemas Económicos Familiares (SEF). *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 492-500.*
- Navarro, H. y Prat, C. 1996. Habilitación agrícola de los tepetates de los valls de México y de Tlaxcala. *In: Boivin P. (Ed.) El campo mexicano: una modernización a marchas forzadas. CEMCA-ORSTOM. Mexico. pp. 253-292*
- Oropeza J-L., Ríos D., Salazar J. y Huerta E. 1996.. Uso de modelos matemáticos de erosión hídrica para la optimización de la rehabilitación de tepetates con fines agrícolas. *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 384-396.*
- Peña D. y Zebrowski, C. 1992. Informe del mapa morfo edafológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, México. Annexes rapport final CEE/ORSTOM TS2 A 212C.
- Prat, C., Báez, A., y Márquez, A. 1996. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3, Texcoco, México. *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 371-383.*
- Prat, C., Ly, B-T., Lepigeon, I., Faugère, G. y Alexandre J-L. 1996. Los sistemas agropecuarios de producción en tepetates en 4 comunidades del altiplano mexicano. *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 482-491.*
- Quantin, P. et al. 1992. Etude des sols volcaniques indurés "tepetates" des bassins de Mexico et de Tlaxcala en vue de leur réhabilitation agricole. Rapport scientifique final. CEE/ORSTOM TS2 A 212C. 77 p.
- Quantin, P. et al. 1997. Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine (Chili, Equateur, Mexique). Rapport scientifique final. CE/ORSTOM TS3 CT930252. 178 p.
- Servenay, A. 1995. Spatialisation et cartographie des affleurements de cangahua par télédétection dans le bassin interandin (Equateur). Mem. DESS, Univ. P. Valéry, Montpellier, France. 111 p.
- Servenay, A. 1996. Les paysages de tepetates du Mexique central volcanique: Identification et caractérisation spatiale par télédétection et SIG des zones agricoles à réhabiliter. Mem. DEA, Univ. Toulouse Le Mirail, France. 90 p.
- Trujillo, G. y Arias, J. 1996. Productividad en cangaha rehabilitada, Ecuador: ensayos agronómicos. *In: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 260-270.*
- Werner, G. 1992. Die Böden der Region Aspan (Hidalgo) und Calpulalpan (Mexico). Erläuterungen zu einer vorläufigen Bodenkarte. Ann. Rapport CEE/ORSTOM. TS2A212C

Zebrowski, C. 1996. Los suelos con cangahua en el Ecuador. *In*: Zebrowski et al. (Eds). Quito, Equateur. pp. 128-137.

Key words: Agricultural reclamation, indurated volcanic soils, Latin America.  
Mots-clés: Réhabilitation agricole, sols volcaniques indurés, Amérique Latine.