

Erosion et conservation, après récupération, des sols volcaniques indurés de l'Équateur et du Mexique

G. de Noni⁽¹⁾, C. Prat⁽¹⁾, P. Quantin⁽²⁾, M. Viennot⁽¹⁾ et C. Zebrowski⁽¹⁾

(1) IRD - 911, av. Agropolis, BP 5045 - 34032 Montpellier cedex 1

(2) 5, rue Boileau - 21000 Dijon

A Claude, à Nicole et à la famille Zebrowski.

RÉSUMÉ

Les sols volcaniques indurés, appelés cangahua en Equateur et tepetate au Mexique, couvrent des surfaces importantes. Ils sont stériles en l'état pour l'agriculture aussi doivent-ils être ameublés puis émiettés en éléments plus fins pour constituer un sol et être mis en culture. Néanmoins, les travaux d'ameublissement rendent le matériau pulvérulent et très érodible.

Grâce à une gamme assez large de traitements traditionnels et améliorés, dont les effets ont été suivis sous pluies simulées (parcelle d'essai de 1 m²) et sous pluies naturelles (parcelles expérimentales de 44, 100 et 1 000 m² et parcelles paysannes de 419 et 1 800 m²), il a été possible de caractériser le comportement à l'érosion de la cangahua et du tepetate ameublés.

Si les résultats obtenus montrent un certain nombre de similitudes de comportement entre tepetate et cangahua lorsqu'ils sont indurés, ameublés et non cultivés, des différences apparaissent cependant sous cultures. En Equateur et sur pentes fortes, le ruissellement et l'érosion sont faibles sous cultures traditionnelles (maïs et avoine) et quasi nuls lorsque sont utilisées des techniques simples de conservation. Au Mexique sur des pentes inférieures et également sous cultures traditionnelles (maïs, blé, orge), même si l'érosion reste modérée, les pertes en eau avoisinent 10 % ce qui est encore trop pour un total pluviométrique de l'ordre de 600 mm/an.

Globalement dans les deux pays, si l'action locale des paysans est positive pour lutter contre l'érosion, il semble nécessaire cependant de poursuivre les recherches dans le domaine de la gestion et de l'économie de l'eau, notamment au Mexique.

Mots clés

Sols volcaniques indurés, tepetate, cangahua, érosion, conservation, culture traditionnelle et améliorée, gestion de l'eau, Equateur, Mexique.

SUMMARY

EROSION AND CONSERVATION OF HARDENED VOLCANIC SOILS OF ECUADOR AND MEXICO, AFTER RESTORATION

Hardened volcanic soils, called cangahua in Ecuador and tepetate in Mexico are wide spreaded. They are unproductive at the natural state to agricultural purpose therefore they must be broken up and disgregated into thinner physical elements to constitute an agricultural productive soil. Nevertheless the breaking up makes the soil very powdery and erodible.

it has been possible to characterize, the erosion behaviour of a restored cangahua and tepetate material, using by a large set of traditional and improved treatments. The effects of which had been observed under artificial showers conditions (in 1 m² test plots) and natural showers conditions (in 44, 100, 1000 m² experimental plots, and 419 and 1800 m² peasants plots).

Although the results indicate some behaviour similitudes between tepetate and cangahua under indurated, break up and no-cultivated conditions, significant differences appear under cultivated conditions. In Ecuador with high slopes, the runoff and erosion are weak under traditional cultivations (maize and oat) and nearly null when using simple conservative techniques. In Mexico with lower slopes, under traditional cultivations too (corn, maize and barley), erosion remains moderate, with a 10 % runoff, but this value is high with a 600 mm total annual rainfall.

As a whole, in those two countries, we can consider the peasant action as positive against erosion, however further research should be done in the field of the management and the improvement of water efficiency, especially in Mexico.

Key-words

Hardened volcanic soils, tepetate, cangahua, erosion, conservation, traditional and improved cultivations, water management, Mexico, Ecuador.

RESUMEN

EROSIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS ENDURECIDOS DE ECUADOR Y DE MÉXICO, DESPUÉS DE LA REHABILITACIÓN

Los suelos volcánicos endurecidos, llamados cangahua en Ecuador y tepetates en México, cubren extensas áreas. En este estado, son estériles para la agricultura, se debe entonces roturar y fraccionarlos en elementos mas finos para obtener un suelo que podrá recibir cultivos. Sin embargo, con los trabajos de rehabilitación el material se vuelve pulverulento y muy sensible a la erosión.

Gracias a una serie bastante larga de tratamientos tradicionales y mejorados, cuyos efectos fueron seguidos bajo lluvias simuladas (parcela experimental de 1 m²) y bajo lluvias naturales (parcelas experimentales de 44, 100 y 1000 m² y parcelas campesinas (de 419 y 1800 m²), fue posible caracterizar el comportamiento de la cangahua y del tepetate rehabilitados frente a la erosión.

Si los resultados obtenidos muestran ciertas semejanzas de comportamiento entre tepetate y cangahua cuando están endurecidos, fraccionados y no cultivados, en cambio aparecen diferencias bajo cultivo. En Ecuador, sobre pendientes fuertes, el escurrimiento y la erosión son ligeros en cultivos tradicionales (maíz y avena) y casi inexistente cuando se usan técnicas sencillas de conservación. En México sobre pendientes menos fuertes y también en cultivos tradicionales (maíz, trigo y cebada), a pesar de que la erosión sea moderada, las pérdidas de agua se acercan al 10 % lo que es todavía elevado para un total pluviométrico del orden de 600 mm/año.

Globalmente en los dos países, la acción local de los campesinos es positiva para luchar contra la erosión, a pesar de que parece necesario continuar con las investigaciones sobre el tema del manejo y del ahorro del agua, en particular en México.

Palabras claves

Suelos volcánicos endurecidos, tepetate, cangahua, erosión, conservación, cultivo tradicional y mejorado, manejo de agua, Mexico, Ecuador.

Parmi les formations volcaniques, il existe des formations particulières qui se caractérisent par la présence d'horizons indurés et qui occupent une grande extension en Amérique latine, notamment en Équateur et au Mexique où elles sont appelées respectivement, *cangahua* et *tepetate*. Ces formations, parfois riches en calcaire, n'affleurent qu'après le décapage par l'érosion des formations plus meubles qui les coiffent et sont incultes en l'état pour l'agriculture. En règle générale, elles sont associées à des paysages dégradés où la population rurale décline par émigration (Colmet-Daage et Zebrowski, 1982-84 ; de Noni *et al.*, 1992 ; Quantin, 1992).

Néanmoins comme dans la plupart des pays en voie de développement où existe aujourd'hui un besoin en nouvelles terres de culture pour répondre à la forte demande alimentaire qui accompagne un accroissement démographique important, l'Équateur et le Mexique ont été conduits à s'intéresser à la récupération agricole de ces formations. Pour pouvoir effectuer cette récupération, il est nécessaire d'agir sur l'induration originelle par des travaux d'ameublissement qui sont réalisés manuellement en Équateur et à l'aide du tracteur au Mexique. Néanmoins, les travaux d'ameublissement rendent le matériau pulvérulent et très sensible à la battance des pluies et à l'érosion linéaire lorsque les pentes s'accroissent.

Les résultats présentés ici ont été obtenus dans le cadre d'un programme international de recherche mené par l'Équateur, le Mexique, l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement, ex. Orstom) et financé par l'Union Européenne, ils se rapportent à des situations de récupération agricole de la *cangahua* et du *tepetate* de deux régions représentatives : le bassin de Quito en Équateur et la grande banlieue agricole de Mexico.

CADRE SPATIAL

Sites et stations d'étude

En Équateur, la *cangahua* est une cendre fine, andésitique ou dacitique, indurée par la présence d'un encroûtement calcaire (Colmet-Daage, 1973 ; Colmet-Daage et Zebrowski, 1982-84, Custode *et al.* 1992). Elle est localisée dans les régions centre et nord du bassin intra-andin où se sont déposées la majeure partie des projections pyroclastiques émises par d'imposants strato-volcans tels le Chimborazo, 6 310 m ou le Cotopaxi, 5 900 m (*figure 1a*). Elle occupe 20 % des terres volcaniques du bassin, soit une surface de l'ordre de 3 000 km² (de Noni *et al.*, 1997b). Elle est située exclusivement entre 2 000 et 2 800 m (climat subhumide, 600 mm/an) et disparaît en altitude lorsque le climat devient plus humide. Lorsque la *cangahua* n'affleure pas, elle est coiffée par des sols isohumiques, de couleur brune, généralement riches en smectites ou par des sols plus clairs et grossiers, sablo-ponceux, le degré d'évolu-

tion de ces sols étant fonction de l'âge d'émission des dépôts volcaniques. Dans cette partie des Andes, le climat est équatorial à 2 saisons des pluies : de septembre à novembre puis de mars à mai. La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 500 et 800 mm et la température moyenne annuelle entre 13 et 16 °C, avec des variations mensuelles qui ne dépassent pas 1 °C autour de ces moyennes. Pour évaluer l'influence des intensités pluviométriques, l'indice d'érosivité défini par Wischmeier et Smith (1978) a été calculé. Les valeurs obtenues, comprises entre 80 et 150 (unités américaines), sont faibles pour le domaine tropical (Roose, 1994) mais conformes aux valeurs obtenues en montagne où les pluies, d'origine orogénique, sont moins intenses qu'en plaine (Pourrut, 1983 et 1994 ; Nouvelot, 1982). L'utilisation des sols est très sélective au niveau social. Les surfaces planes sont occupées par de grands domaines d'haciendas et utilisées pour l'élevage bovin. La culture du maïs, qui prédomine dans la région, est rejetée sur les versants, sur de petites parcelles paysannes ("minifundio") où l'érosion a provoqué le décapage de larges surfaces de *cangahua*.

Les stations étudiées se situent dans le grand bassin de Quito, à La Tola (2 650 m) et à Cangahua (2 850 m). Elles sont plantées en maïs ou en avoine selon les protocoles expérimentaux, sur un sol correspondant à une *cangahua* ameublie sur 50 cm de profondeur environ. On observe localement en surface quelques témoins résiduels d'un sol isohumique limono-argileux, riche en smectites et halloysites, qui sera appelé ici sol originel (Colmet Daage et Zebrowski, 1982-84).

Au Mexique, les zones à *tepetates* sont situées sur l'axe néo-volcanique qui traverse le pays d'est en ouest (Quantin *et al.*, 1993 et 1997). Précisément, les recherches ont été menées sur les versants occidental et oriental de la Sierra Nevada qui sépare les bassins de Texcoco et de Tlaxcala (*figure 1b*). Dans cette région, les sols sont dérivés de dépôts volcaniques pyroclastiques, cendres rhyolitiques ou dacitiques très siliceuses et alcalines (Quantin, 1992 ; Prat *et al.*, 1997). Le *tepetate* se situe sur les piémonts et glacis où règne un climat à saison sèche marquée. Dans les zones moins érodées, le *tepetate* est recouvert actuellement en surface par un dépôt sablo-limoneux. Le climat de la région est un climat intertropical différencié en raison de l'altitude et d'effets de versants. Dans l'étage où est situé le *tepetate*, la température est comprise entre 11 et 15 ° et les pluies, qui tombent de mai à novembre, oscillent entre 600 et 900 mm par an (*figure 2*). Comme en Équateur, l'indice d'érosivité de Wischmeier, qui est inférieur à 150 (unités américaines), est faible (Prat, 1997). Concernant l'utilisation des sols, la gestion des terres est assurée par de petits paysans qui cultivent le maïs associé au haricot et à la fève, en rotation, tous les 2 à 3 ans avec de l'orge ou du blé.

La station d'étude est située à San Miguel Tlaxpan (2 650 m d'altitude) dans la grande banlieue agricole de Mexico

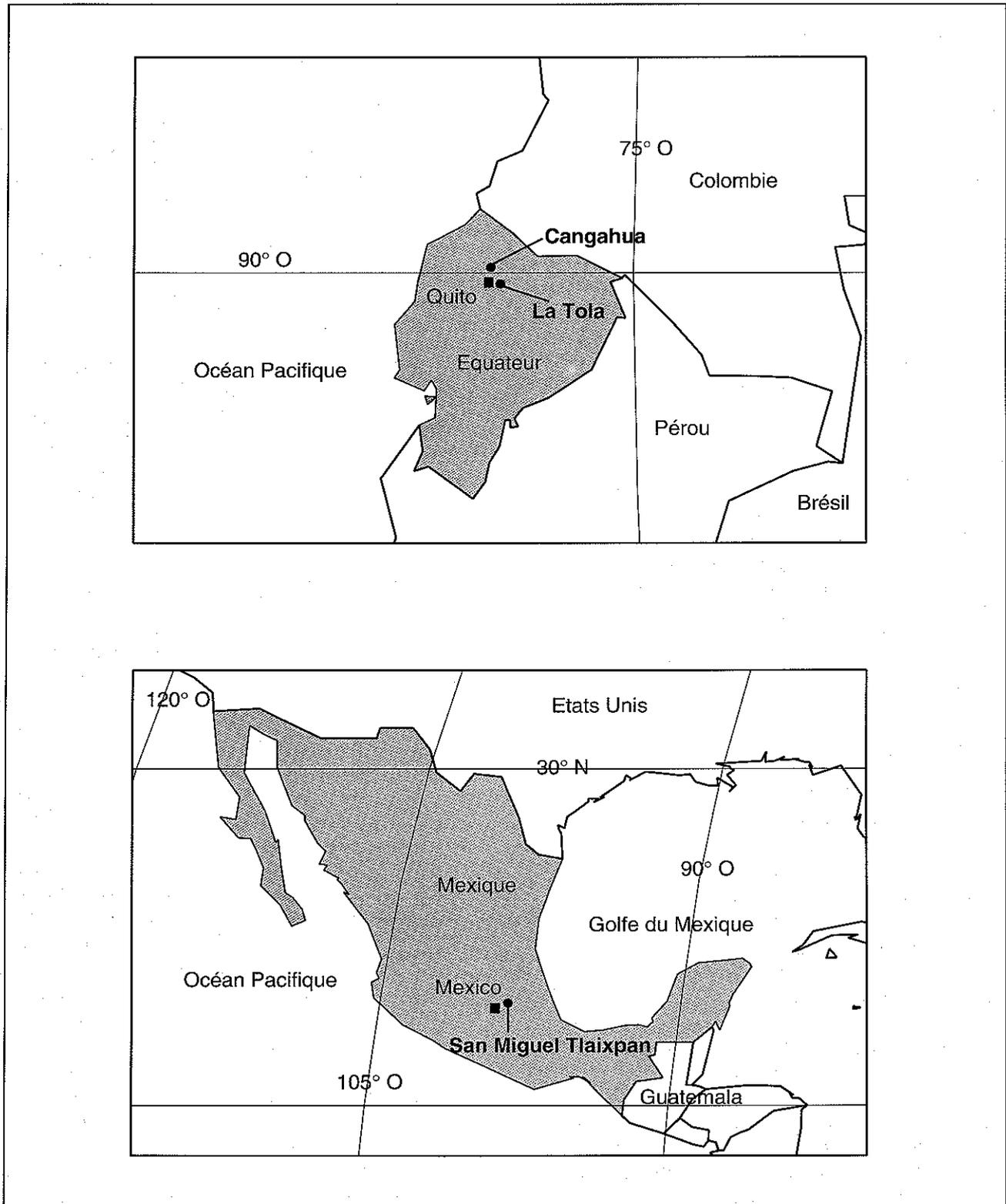
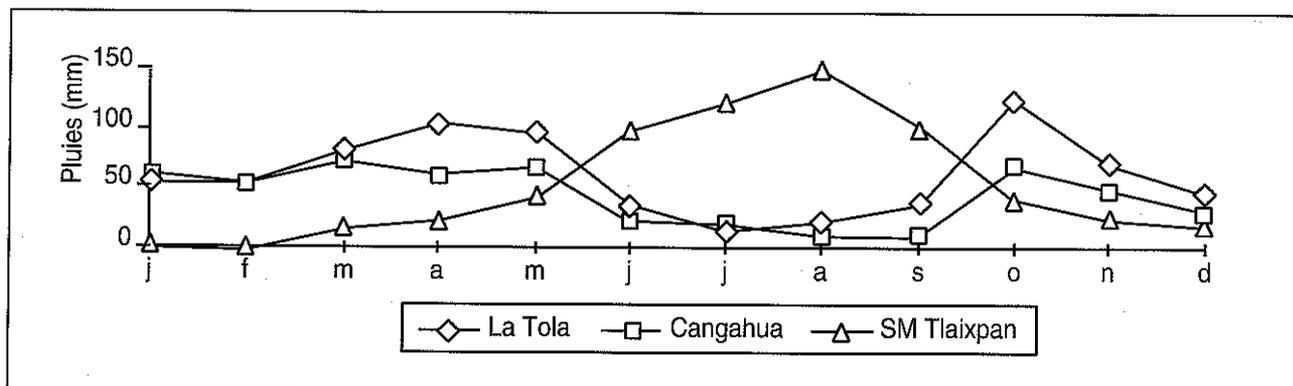
Figure 1 - Localisation des sites d'études en Equateur (1a) et au Mexique (1b)**Figure 1 - Localization of sites study in Ecuador (1a) and in Mexico (1b)**

Figure 2 - Pluies moyennes mensuelles sur les stations de l'Équateur et du Mexique**Figure 2** - Mean monthly rainfalls on the stations of Ecuador and Mexico

où les tepetates occupent près de 40 % des surfaces, soit environ 400 km². Le sol est un tepetate ameubli, planté en maïs. Comme pour les stations d'Équateur, on trouve également sur le tepetate, dans les zones préservées de l'érosion, un sol isohumique riche en smectites (Quantin *et al.*, 1992).

Les sols

Tant en Équateur qu'au Mexique, les sols des stations ne sont pas des sols en tant que tels, issus d'une pédogenèse particulière, mais des formations résultant de l'ameublissement mécanique de la cangahua ou du tepetate et correspondant à un horizon peu différencié, de 40 à 60 cm de profondeur. Avant ameublissement, ces formations sont indurées et se caractérisent par leur compacité et leur dureté, celle-ci pouvant augmenter avec la présence de calcaire. Après ameublissement, cangahua et tepetate peuvent être mis en culture ; néanmoins ils présentent dans tous les cas des contraintes physiques, chimiques et biologiques importantes.

Concernant la composition granulométrique, la cangahua montre une faible quantité d'argiles (*tableau 1*) comparative aux limons et aux sables fins qui dépassent 60 % de la composition granulométrique de l'échantillon (Colmet-Daage et Zebrowski, 1982-84). En revanche au Mexique (Peña et Zebrowski, 1992), la texture du tepetate est plus fine et montre une fraction argileuse près de 3 fois supérieure à celle de la cangahua (*tableau 1*).

En outre, cangahua et tepetate présentent les caractéristiques chimiques suivantes. Le pH, neutre à légèrement basique, varie avec la teneur en calcaire, les valeurs atteignant 8,5 à 9 sur substrat pétrocalcique. Les teneurs en C et N, respectivement de l'ordre de 1,7 et 0,04 pour 1000, sont faibles et il en est de même du phosphore assimilable < 3 ppm (Echevers *et al.*, 1997). La capacité d'échange cationique est en général élevée (de 15 à 25 mé/100g). Les teneurs en bases

échangeables exprimées mé/100 g sont également élevées : les valeurs de Ca, Mg et K échangeables varient respectivement de 9 à 14, de 4,5 à 11 et de 0,8 à 1,9 mé sur cangahua et de 7 à 18, de 6 à 10 et de 0,8 à 1,2 mé sur tepetate (Custode *et al.*, 1992 ; Quantin, 1992). Sur tous les tepetates, les réserves minérales en potassium sont importantes (2 à 3 pour 1000).

MÉTHODES D'ÉTUDE

Dispositifs de mesure du ruissellement et de l'érosion

En Équateur et au Mexique, les mesures se sont déroulées sur plusieurs périodes s'échelonnant de 1986 à 1996 et ont été effectuées sur des stations d'étude constituées par des parcelles paysannes de grande taille (de 419 à 1800 m²) et par des parcelles expérimentales plus petites (44, 100 et 1000 m²), de forme rectangulaire et délimitées sur le terrain par des planches de bois fichées dans le sol. Des bacs récepteurs en tôle, munis de partiteurs, recueillent au pied des parcelles l'eau et la terre entraînées. Chaque station est équipée d'un pluviographe enregistreur. Les parcelles ont été soumises à différents traitements, les uns reproduisant les conditions de l'agriculture locale, les autres permettant de tester quelques améliorations pour lutter contre l'érosion. En outre en Équateur et au Mexique, une parcelle a été réservée sur chaque station pour pouvoir appliquer le protocole de Wischmeier (1978).

En Équateur, l'ameublissement de la cangahua a été réalisé de façon traditionnelle et identique sur les 2 stations d'étude de La Tola et de Cangahua et sur toutes les parcelles quels que soient les traitements appliqués. La cangahua dure a été fragmentée à la pioche et à la barre à mine en blocs décimétriques

puis ceux-ci ont été émiettés, en utilisant les mêmes outils, en mottes plus petites de diamètre moyen de l'ordre de 5 cm. Cette dernière opération s'est accompagnée de l'enfouissement d'une petite quantité de fumier (< 15 t/ha). On estime qu'il faut 1 journée de travail par personne pour ameublir 100 m². Les traitements reproduisant les conditions de l'agriculture locale ont été réalisés conjointement avec les paysans et en suivant scrupuleusement les pratiques traditionnelles. Les semences de maïs et d'avoine choisies sont celles qu'utilisent localement les paysans, tous les labours et les différentes pratiques culturales ont été réalisés à la pioche et en suivant les courbes de niveau. Concernant les techniques de conservation, celles-ci ont été testées sur les parcelles améliorées de 1 000 m². A la station de La Tola, seule a été testée la technique des bandes enherbées isohypses, de 2 m de large et espacées de 12 m. Trois espèces de graminées ont été suivies : le Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*), "le pasto lloron" (*Eragrostis curvula*) et le "pasto azul" (*Dactylis glomerata*). A la station de Cangahua, deux techniques ont été testées. Le choix s'est porté sur des ouvrages également isohypses mais constitués sur l'une des deux parcelles de 1 000 m² par des cordons pierreux en blocs de cangahua dur constituant un muret filtrant et sur l'autre par des fossés d'absorption isohypses (60 cm de profondeur) doublés par une bande arbustive de "chilca" (*Spartium junceum*). La distance entre cordons et entre fossés est la même que celle retenue pour la station de La Tola entre les bandes enherbées (de Noni *et al.*, 1992; de Noni *et al.*, 1997b; Trujillo *et al.*, 1997).

Au Mexique, la mise en culture du tepetate de la station de San Miguel Tlaixpan s'est faite de façon mécanique comme le font habituellement les paysans de la région. Elle a demandé l'emploi d'engins lourds, tracteurs à chenilles équipés de dents de 60 cm qui défoncent le matériau et le réduisent en blocs. La reprise et l'émiettement s'effectuent alors à la charrue à disque ou au cultivateur (Werner, 1992). Le diamètre moyen de l'agrégat ou de la petite motte, qui ne dépasse pas 2 cm, est inférieur à celui obtenu manuellement. Comme sur les stations

d'Équateur, les semences utilisées sont celles qu'emploient traditionnellement les paysans. Les labours et les différentes façons culturales ont été réalisés systématiquement de manière isohypse, au tracteur sur les grandes parcelles paysannes et à la pioche sur les parcelles expérimentales de 44 m² (Prat *et al.*, 1997). Il n'y a pas eu d'expérimentation sur les techniques de conservation des sols.

Mesures hydrodynamiques sous pluies simulées

Ces mesures ne concernent que l'Équateur. L'appareil utilisé est le mini-simulateur de pluie ou infiltromètre mis au point à l'IRD par Asseline et Valentin (1978), puis amélioré (Asseline, 1997). Cet appareil permet de générer artificiellement des averses dont l'intensité est proche de celle des pluies naturelles (de 15 à 150 mm/h) et de mesurer leur influence sur le ruissellement et l'érosion sur une micro-parcelle de 1 m² de surface.

Le protocole tient compte des données pluviométriques mesurées sur les stations d'étude qui font ressortir l'influence de l'intensité en 15 minutes (de Noni *et al.*, 1997b) et qui a été préférée à l'intensité en 30 minutes utilisée habituellement à la suite des travaux de Wischmeier et Smith. Pour un même traitement, une intensité de 60 mm/h en 15 minutes a été appliquée 3 fois de suite, entrecoupée d'un temps de ressuyage de 24 heures entre la première et la seconde pluie et de 5 heures entre la seconde et la troisième pluie.

Récapitulatif des dispositifs et des traitements utilisés

Compte tenu de la gamme assez large de dispositifs et de protocoles utilisés tant en Équateur qu'au Mexique, l'ensemble de ceux-ci a été rassemblé dans le *tableau 2* et organisé dans le sens d'une complexité croissante des conditions expérimentales.

En Équateur, à la station de La Tola :

A. sous pluies simulées et parcelles d'1 m², sur pente de

Tableau 1 - Composition granulométrique de cangahuas et de tepetates (moyennes en % de sol sec).

Table 1 - Mean granulometry of cangahuas and tepetates (in % of dry soil)

		argile	limon fin	limon grossier	sable fin	sable grossier
Equateur	minimum	6,9	15,2	5,1	18,2	9,7
	moyenne	12,7	26,6	8,7	26,0	24,3
	maximum	23,6	40,7	11,3	35,2	40,3
Mexique	minimum	25,1	12,8			21,7
	moyenne	35,6	21,2			43,2
	maximum	42,0	41,8			60,4

Source : Colmet-Daage et Zebrowski, 1982-84; Peña et Zebrowski, 1992

8 % maintenue sans végétation :

- a1) sur la cangahua dure non ameublie (sp1),
- a2) sur la même cangahua ameublie manuellement de façon traditionnelle (sp2).

B. sous pluies naturelles, sur cangahua ameublie traditionnellement et parcelles de dimensions différentes, sur des surfaces de 100 et 1 000 m² dont les pentes varient entre 15 et 20 % :

- b1) parcelle témoin de Wischmeier maintenue sans végétation (Lt1),
- b2) parcelles sous cultures traditionnelles d'avoine avec (P2) et sans pré-irrigation (P1) d'une part, avec cordons pierreux constituant un muret filtrant (P3) et sur terrasse plane (P4) d'autre part,
- b3) parcelles sous cultures traditionnelles de maïs sur billons isohypses (Lt2) d'une part, et parcelle améliorée avec bandes enherbées et billons isohypses (Lt3) d'autre part.

En Équateur, à la station de Cangahua :

C. sous pluies naturelles sur cangahua ameublie traditionnellement sur parcelles de dimensions différentes sur des surfaces de 100 et 1 000 m² dont les pentes varient de 15 à 18 % :

- c1) parcelle témoin de Wischmeier maintenue sans végétation (C1),
- c2) parcelles expérimentales sous culture traditionnelle d'avoine avec (P2) et sans pré irrigation (P1) d'une part, avec cordons pierreux constituant un muret filtrant (P3) d'autre part,
- c3) parcelles sous cultures traditionnelles de maïs sur billons isohypses (C2) d'une part, parcelles améliorées sous culture traditionnelle de maïs avec cordons pierreux constituant un muret filtrant (C3) et avec fossés et bandes isohypses de végétation arbustive (C4) d'autre part.

Au Mexique, à la station de San Miguel Tlaixpan :

D. sous pluies naturelles, sur parcelles expérimentales de 44 m² et pente de 9 % :

- d1) sur tepetate induré non ameubli (V1, W6),
- d2) sur tepetate ameubli mécaniquement de manière traditionnelle, parcelle témoin de Wischmeier sous-solée à 40 cm et maintenue sans végétation (V2 et W4), parcelle sarclée et non cultivée (W3),
- d3) sur tepetate ameubli mécaniquement de manière traditionnelle, parcelle sous-solée à 40 cm, à billons isohypses non cultivée (V3) et cultivée en maïs semé en poquets (V4),
- d4) sur tepetate ameubli mécaniquement de manière traditionnelle, parcelles sous-solées à 40 cm, blé semé à plat et au semoir avec (W5a) et sans apport de fumier (W5b),
- d5) sur sol originel labouré mécaniquement, à billons isohypses non cultivé (V5) et cultivé en maïs semé en poquet (V7).

E. sous pluies naturelles, sur parcelles paysannes de superficie variant de 419 à 1800 m² et pentes comprises entre 2,5 et 8 % :

- e1) sur tepetate induré non ameubli (T1),
- e2) sur tepetate ameubli mécaniquement de manière traditionnelle, parcelle sous-solée à 60 cm, association maïs-fève-haricot, sur billons isohypses (T2) d'une part, parcelle sous-solée à 40 cm, rotation orge semé à plat (1993 et 1996) et maïs sur billons isohypses en 1994 et 1995 (T3) d'autre part,
- e3) sur tepetate ameubli mécaniquement de manière traditionnelle, parcelle sous-solée à 40 cm, association maïs-fève-haricot semés en poquet, sur billons isohypses avec apport de fumier de 13t/ha (T4), idem maïs billons isohypses sans fumier (T6), idem maïs billons isohypses cloisonnés sans fumier (T5),
- e4) sur sol originel labouré mécaniquement, à billons isohypses, cultivé en association maïs-fève-haricot semés en poquet (T7).

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats discutés ici ont tous été rassemblés dans le *tableau 2* où figure l'ensemble des dispositifs et des traitements s'y rapportant (de Noni *et al.*, 1989-90; 1997a, 1997b; Quantin *et al.*, 1992, 1993, 1997; Prat *et al.*, 1997).

L'examen des résultats obtenus en Équateur à La Tola conduit aux constatations suivantes :

- sous pluies simulées, la cangahua dure, non ameublie, compacte et massive présente de très mauvaises propriétés hydrodynamiques: elle ruisselle beaucoup, mais en revanche, en raison de l'absence de matériel dispersable, érode peu. Ameublie, mais non cultivée, le coefficient de ruissellement diminue de plus de moitié tout en restant important (37 %), la charge solide entraînée reste faible (1,3 t/ha).

- sous pluies naturelles et parcelles de 100 m², la cangahua ameublie et travaillée mais non cultivée (parcelle témoin de Wischmeier) présente un coefficient de ruissellement encore conséquent (18,6 %), mais surtout un taux élevé des pertes en terre qui avoisine les 100 t/ha/an. Mise sous culture d'avoine, c'est-à-dire protégée par la couverture végétale externe et le système racinaire graminéen, le coefficient de ruissellement tombe à moins de 2 % et les pertes en terre diminuent de près de 80 %. Les améliorations des pratiques culturales et de conservation, pré irrigation, terrasse plane, muret ne vont pas améliorer davantage l'infiltration mais contribuent à diminuer encore sensiblement l'érosion. Dans ce domaine c'est le muret pierreux faisant cordon qui se révèle le plus efficace. Il parvient pratiquement à réduire à zéro l'érosion;

- dans les mêmes conditions, mais sous culture traditionnelle de maïs, les bandes isohypses enherbées des grandes

STATIONS	SUPERFICIE m ²	PENTE %	PLUVIOMETRIE (annuelle moyenne, mm)	TRAITEMENTS
La Tola (Equateur) 1990	1 (1mx1m)	8	IM15 = 60mm/h	cangahua indurée
1986-91	100 (20mx5m)	20	790	cangahua ameublie à la pioche à 40 cm de prof., non cultivée
1994-96	100 (10mx10m)	15		cangahua ameublie à la pioche, billons isohypses, maïs semé en poquet cangahua ameublie à la pioche, avoine semée à plat et à la volée
1986-91	1000 (50mx20m)	20		cangahua ameublie à la pioche, avoine semée à plat et à la volée + pré irrigation cangahua ameublie à la pioche, avoine semée à plat et à la volée + muret filtrant cangahua ameublie, avoine semée à plat et à la volée + terrasse plane
Cangahua (Equateur) 1986-91	100 (20mx5m)	18	524	cangahua ameublie à la pioche à 40 cm de prof., non cultivée
1994-96	100 (10mx10m)	15		cangahua ameublie à la pioche, billons isohypses, maïs semé en poquet cangahua ameublie à la pioche, avoine semée à plat et à la volée
1986-91	1000 (50mx20m)	18		cangahua ameublie à la pioche, avoine semée à plat et à la volée + pré irrigation cangahua ameublie à la pioche, avoine semée à plat et à la volée + muret filtrant cangahua ameublie à la pioche, billons isohypses, maïs semé en poquet + murets filtrants isohypses (distance entre murets : 12 m) cangahua ameublie à la pioche, billons isohypses, maïs semé en poquet + fossés et arbustes isohypses (distance entre fossés : 12 m)
San Miguel Tlaixpan (Mexique) 1991	44 (22mx2m)	9	627	tepetate induré
1994-96	44 (22mx2m)	9		tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40 cm de profondeur, non cultivé
				tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40 cm de profondeur, billons isohypses, non cultivé
1993-96	1800 470 773 732 792 419 713	8 4,7 3,2 3,4 2,5 4,4 5,9	tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40 cm de profondeur, billons isohypses, maïs semé en poquet	
			Sol originel labouré mécaniquement, billons isohypses, non cultivé	
			Sol originel labouré mécaniquement, billons isohypses, maïs semé en poquet	
			tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40 cm de profondeur, sarcié non cultivé	
			tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40 cm de profondeur, non cultivé	
			tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40 cm de profondeur, blé semé à plat et au semoir, apport de fumier (20 t/ha)	
			tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40 cm de profondeur, blé semé à plat et au semoir, sans apport de fumier	
tepetate induré				
tepetate induré				
tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 60cm de profondeur, association maïs-fève-haricot semés en poquet, billons isohypses				
tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40cm de profondeur, rotation orge semé à plat (1993 et 96) et maïs + billons isohypses (1994 et 95)				
tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40cm de profondeur, association maïs-fève-haricot semés en poquet, billons isohypses, apport de fumier (13 t/ha)				
tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40cm de profondeur, association maïs-fève-haricot semés en poquet, billons isohypses et cloisonnés				
tepetate ameubli mécaniquement, sous-solé à 40cm de profondeur, association maïs-fève-haricot semés en poquet, billons isohypses, sans fumier				
Sol originel labouré mécaniquement, billons isohypses, association maïs-fève-haricot semé en poquet				

Source: de Noni et al., 1989-90, 1997a, 1997b; Quantin et al., 1992, 1993, 1997; Prat et al., 1997

		RUISSELLEMENT %	EROSION t/ha/an
sp1	Sans traitement	88	0,4
sp2	Protocole Wischmeier	37	1,3
Lt1	Protocole Wischmeier	18,6	96
Lt2	Pratiques traditionnelles	6,1	19,4
P1	Pratiques traditionnelles	1,9	17,7
P2	Pratiques traditionnelles	3,2	6,1
P3	+	2	0,8
P4	traitements améliorés	3,3	5,7
Lt3	Pratiques tradition. + ouvrages conservatoires	2,1	4,5
C1	Protocole Wischmeier	5	50,5
C2	Pratiques traditionnelles	1,2	3,2
p1	Pratiques traditionnelles	1,3	2,1
p2	Pratiques tradition. +	0,9	1,1
p3	traitements améliorés	0,9	0,6
C3	Pratiques traditionnelles +	0,2	0,3
C4	ouvrages conservatoires	0,2	0,4
V1	Sans traitement	80	5
V2	Protocole Wischmeier	45	22
V3	Pratiques traditionnelles	12	1,2
V4		5	1
V5		12	1,8
V6		12	1,1
W3	Pratiques tradition. + sarclage	28,9	31,6
W4	Protocole Wischmeier	33,1	22,7
W5a	Pratiques tradition. + apport ou non de fumier	15,3	2,1
W5b		16	3,3
W6	Sans traitement	31,3	15
T1	Sans traitement	42,3	19
T2	Pratiques traditionnelles	30,9	10,1
T3		31,8	7,7
T4	+	18,4	2
T5	traitements améliorés	7,1	0,8
T6	Pratiques traditionnelles	10,2	0,8
T7		8,9	1,4

Tableau 2 - Tableau récapitulatif des dispositifs, des traitements et des résultats

Table 2 - Recapitulative table of devices, treatments and results

parcelles paysannes, faciles à réaliser, se révèlent bien plus efficaces que les billons isohypses : les pertes en eau sont contenues à 2 % des pluies et les pertes en terre tombent à une valeur négligeable (0,7 t/ha/an).

L'examen des résultats obtenus en Équateur à Cangahua permet de mettre en évidence :

- que sous pluies naturelles et parcelle de 100 m², la cangahua ameublie et travaillée mais non cultivée (parcelle témoin de Wischmeier) présente un coefficient de ruissellement faible et un taux d'érosion élevé (50 t/ha/an). Mise en culture traditionnelle d'avoine, c'est-à-dire sans pratiques de conservation mais protégée par la couverture végétale externe et le système racinaire graminéen, le coefficient de ruissellement et les taux d'érosion deviennent très faibles (respectivement 1,3 % et 2,1 t/ha/an). Les pratiques culturales et de conservation testées, pré irrigation et muret filtrant, réduisent encore davantage les pertes en eau et en terre qui deviennent alors négligeables;

- qu'il en est de même sur les parcelles améliorées de 1000 m² cultivées de manière traditionnelle en maïs. Murets, fossés et bandes isohypses arbustives éliminent pratiquement le ruissellement et l'érosion.

L'examen des résultats obtenus au Mexique à la station de San Miguel Tlaixpan montre que :

- tout comme en Équateur, le tepetate induré non ameubli présente d'assez grandes variations de comportement. Compact, il produit cependant des coefficients de ruissellement élevés (33 à 80 % de la pluie), et en raison du manque de matériel dispersable, des taux d'érosion variant entre 5 et 19 t/ha/an;

- sur tepetate ameubli, sous-solé, sarclé ou pas mais non cultivé, les pertes en eau et en terre ne diminuent pas pour autant (respectivement de l'ordre de 30 à 40 % et de 22 à 31 t/ha/an);

- sur le même matériau, sous-solé, travaillé de manière traditionnelle en billons isohypses mais non cultivé, les valeurs de pertes en eau précédentes diminuent de moitié et celles de pertes en terre tombent à une valeur très faible (1,2 t/ha/an). Dans les mêmes conditions, maïs cultivé, c'est-à-dire recevant la protection du couvert végétal, ces dernières valeurs diminuent encore nettement pour devenir faibles voire insignifiantes. Cela signifie que les pratiques culturales locales utilisées pour la principale culture, le maïs, suffisent à abaisser ruissellement et érosion à des taux tout à fait raisonnables;

- sur tepetate ameubli, sous-solé, cultivé traditionnellement en blé semé à plat et au semoir, la comparaison des valeurs obtenues sur les parcelles W5a et W5b indique que l'apport de fumier, à la dose locale-

ment importante de 13 t/ha, ne semble pas avoir une influence sur le ruissellement et l'érosion ;

- sur le même matériau, sur billons isohypses et sur parcelles paysannes de grande taille, les rotations traditionnelles, orge, maïs, et associations de grains maïs-fève-haricot qui obligent à un travail répété du sol, produisent des pertes en eau élevées de l'ordre de 30 % de la pluie tombée et des pertes en terre variant entre 7 et 10 t/ha/an. Ce n'est qu'après apport de fumier que l'on parvient à diviser le ruissellement par deux et l'érosion par 4 ou 5. L'adoption additionnelle du cloisonnement des billons isohypses stoppe les pertes en terre mais ne parvient pas à faire tomber le taux de ruissellement sous la barre des 7 % ;

- enfin, sur le sol originel qui recouvre le tepetate et qui peut être considéré comme le meilleur substrat possible, la même association de grains sur billons isohypses conduit à des valeurs proches des précédentes. Il semble difficile quelles que soient la pente pourtant faible pour des paysages de montagne (2,5 à 8 %), et les pratiques de cultures et de conservation testées pour cette triple culture associée de grains, d'abaisser le coefficient de ruissellement sous les 10 %, ce qui compte-tenu de la pluviométrie annuelle modeste correspond à une réduction importante de l'eau disponible pour la plante de l'ordre de 60 mm. Il faut sans doute incriminer l'instabilité structurale de l'horizon de surface de ces sols.

De la comparaison des résultats obtenus en Équateur dans les deux stations de La Tola et Cangahua et des discussions qui précèdent, on peut tirer les enseignements suivants :

- la nature différente des cangahuas équatoriennes (roche mère, pédogenèse, situation) confère au matériau ameubli qui en dérive des coefficients de ruissellement variables (18,6 % à la Tola contre 5 % à Cangahua) mais des taux d'érosion élevés (respectivement 96 t/ha/an et 50,5 t/ha/an dans les deux stations) ;

- la protection du couvert végétal et du système racinaire de la graminée, que ce soit l'avoine ou le maïs, cultivé de manière traditionnelle, c'est-à-dire sans pratique culturale ou de conservation perfectionnée, réduit déjà, de manière variable mais généralement importante, et ce malgré les fortes pentes, les pertes en eau et en terre ;

- les pratiques culturales et/ou de conservation perfectionnées testées, appliquées seules ou associées, améliorent encore davantage ces résultats, mais on est en droit de se demander si le rapport travail-investissement (coût) sur les quantités de terre et d'eau préservées et l'augmentation des rendements (gains) vaut dans certains cas de préconiser certaines pratiques qui risquent, en fonction du travail requis et du bénéfice obtenu, de ne pas être suivies par le petit agriculteur local. Pour leur coût faible et leur facilité d'exécution, les pratiques dites "végétatives", bandes isohypses enherbées ou arbustives, seront préférées aux pratiques dites "mécaniques"

plus lourdes, onéreuses et dangereuses (fossés, terrasses). La technique des cordons pierreux, ici les murets filtrants constitués des blocs de cangahua ayant résisté à l'ameublissement et que le paysan doit de toute façon retirer du champ, est également à préconiser.

Les résultats obtenus au Mexique sont moins encourageants que ceux d'Équateur. Si le comportement du tepetate induré et ameubli non cultivé reste comparable à celui de la cangahua équatorienne sur petites parcelles expérimentales et si sous cultures, les pertes en terre aussi bien sur petites que sur grandes parcelles restent modérées et contrôlées par des traitements améliorés, se pose cependant le problème des pertes en eau. En effet, l'association culturale traditionnelle maïs-fève-haricot provoque une perte en eau par ruissellement superficiel de l'ordre de 10 % et plus qui hypothèque les chances de réussite et de bons rendements des récoltes. C'est dans ce domaine de gestion et d'économie de l'eau que des recherches doivent être entreprises.

CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude réalisée sur des sites représentatifs montrent que même si le comportement du tepetate mexicain induré et ameubli non cultivé reste comparable à celui de la cangahua équatorienne sur petites parcelles expérimentales : tendance élevée au ruissellement et à l'érosion, surtout lorsque le sol est travaillé mécaniquement (parcelles témoins type Wischmeier), les choses changent sous culture. Alors qu'en Équateur, sur pentes fortes et sous cultures de maïs et d'avoine, les pertes en eau et en terre aussi bien sur petites que sur grandes parcelles restent modérées voire insignifiantes et sont assez facilement contrôlées par des pratiques culturales et de conservation, il n'en est pas de même au Mexique. Sur les versants de pentes moyennes inférieures à 8-9 % de la région mexicaine étudiée, les différentes cultures traditionnelles testées, qu'il s'agisse de maïs et de blé, de la rotation orge-maïs ou de l'association maïs-fève-haricot, provoquent une perte en eau par ruissellement superficiel de l'ordre de 10 % et plus, même lorsque les pertes en terre sont modérées. Cette perte en eau de près de 60 mm pour un total pluviométrique déjà réduit hypothèque les chances de réussite des récoltes et l'obtention de bons rendements. Il faut noter dans les deux pays une remarquable adéquation des méthodes culturales traditionnelles à résoudre les effets de l'érosion hydrique pour ce qui est des pertes en terre. Dans les régions étudiées, les paysans andins des deux pays maîtrisent en grande partie la gestion de leurs terres.

Les résultats de ce travail ont montré que l'introduction et l'utilisation de pratiques biologiques simples et peu coûteuses de conservation telles que les bandes d'arrêts de végétation naturelle herbacées ou arbustives et les cordons pierreux pro-

venant des blocs résiduels de tepetate et cangahua pouvaient constituer des solutions radicales dans la lutte contre l'érosion aussi efficaces que des solutions technologiques mécaniques plus lourdes, compliquées et onéreuses. Ces résultats sont encourageants. C'est cependant dans le domaine de la gestion et de l'économie de l'eau que des recherches doivent être entreprises ou poursuivies, en particulier au Mexique. Il est évident que des études sur la gestion et la reconstitution du stock organique déficient de ces formations volcaniques indurées ameublées et le rôle à long terme de l'apport de fumier sur la stabilité structurale sont nécessaires si l'on veut réhabiliter de manière satisfaisante ces matériaux qui occupent de larges surfaces dans les deux pays.

BIBLIOGRAPHIE

- Asseline J., Valentin C., 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion, Cah. ORSTOM, ser. Hydrol., 15 (4), 321-349.
- Asseline J., 1997 - Le simulateur de pluie en 1997. Adaptations aux zones semi-arides et de montagne, Bul. réseau Erosion, 17, 272-281.
- Colmet-Daage F., 1973 - Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques, Parties 1 à 4, Ed. ORSTOM-Antilles, n°78.
- Colmet-Daage F., Zebrowski C., 1982-84 - Mapas de suelos de la Sierra ecuatoriana, 1/200.000, Accord de Coopération MAG-ORSTOM, Quito (Équateur).
- Custode E., de Noni G., Trujillo G. et Viennot M., 1992 - La cangahua en el Ecuador : caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión. Terra vol. 10, Mexico, 332-346.
- de Noni G., Viennot M., Trujillo G., 1989-1990 - Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Équateur, Cah. ORSTOM, série pédologie, vol. XXV, n° 1-2. Paris, 183-196.
- de Noni G., Viennot M., Trujillo G., Custode E., 1992 - Análisis histórico, social y económico de la cangahua en Ecuador. Terra vol X, Mexico, 503-514.
- de Noni G., Viennot M., Trujillo G., Custode E., 1997a - Ruissellement et érosion sur des parcelles de cangahua réhabilitée pour l'agriculture de 1994 à 1996, Équateur. Memorias del III Simposio internacional Quito, diciembre 1996, 331-342.
- de Noni G., Viennot M., Asseline J., Trujillo G., 1997b - L'homme, la montagne et l'érosion des sols cultivés. Cas des Andes équatoriennes (Amérique du Sud). Orstom Montpellier, 200 p., 16 cartes, 20 tableaux, 38 fig., annexes (sous presse).
- Etchevers J., Pérez MA., Navarro H., 1997 - Dinámica de la materia orgánica Y del N en tepetates habilitados para la producción agrícola. Memorias del III Simposio internacional Quito, diciembre 1996, 213-224.
- Nouvelot J.F., 1982 - Normas pluviométricas propuestas para el Ecuador, PRO-NAREG-ORSTOM, Quito.
- Peña D., Zebrowski C., 1992 - Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (Mexico). Informe del mapa morfo-edafológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada, anexo al informe final, Contrato CCE-Orstom N° TS2-0212, 101p.
- Pourrut P., 1983 - Los climas del Ecuador. Fundamentos explicativos, Quito, documentos de investigación n°4, CEDIG-ORSTOM, 8-43.
- Pourrut P., 1994 - L'eau en Équateur, Ed. ORSTOM " Etudes et Thèses, Paris, 140 p.
- Prat C., 1997 - Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaxpán (Texcoco, México) Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetates 13, Texcoco, México. Memorias del III Simposio internacional Quito, diciembre 1996, 359-370.
- Prat C, Báez A. y Márquez A., 1997 - Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetates 13, Texcoco, México. Memorias del III Simposio internacional Quito, diciembre 1996, 371-383.
- 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 n° TS2 A 212 C. 77p.
- Quantin P., Prat C. et Zebrowski., 1993 - Erosion et restauration de sols volcaniques indurés "tepetates" de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique. Cah. ORSTOM, série pédologie, vol. XXVIII, n° 2. Paris, 175-186.
- Quantin P. *et al.*, 1997 - Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine (Chili, Équateur et Mexique). Rapport scientifique final, UE ERB TS3*CT93 0252. 178P.
- Roose E., 1994 - Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, FAO, 70, 420.
- Trujillo G. Arias J., 1997 - Rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos en Ecuador : ensayos agronómicos (1994-1996). Memorias del III Simposio internacional Quito, diciembre 1996, 260-270.
- Werner G., 1992 - Suelo volcánicos (tepetates) en el Estado de Tlaxcala : distribución, rehabilitación, manejo y conservación). Terra vol.10, Mexico, 347-354.
- Wischnmeier W.H. et Smith D.D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation plannig. USDA Agr. Handbook n° 537.

