

Réhabilitation de sols volcaniques dégradés à l'aide d'amendements organiques au Salvador (Amérique centrale)

Jean COLLINET (1) et Manuel MAZARIEGO (2)

(1) Orstom/Catie, Costa Rica.

(2) Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, Salvador.

RÉSUMÉ

*Au Salvador (Amérique centrale), de nombreux sols différenciés sur cendres et ponces volcaniques du quaternaire ont disparu du fait d'une forte érosion d'origine anthropique. On restaure actuellement ces matériaux en incorporant des amendements organiques de différentes origines. L'évolution des taux de matière organique et la reconstruction d'un complexe absorbant sont suivies sur sept parcelles expérimentales de 400 m² installées en milieu paysan. Les premières années, le traitement le plus intéressant pour les rendements du maïs a été le fumier de poule ; mais il apparaît maintenant que l'incorporation de matière végétale fraîche provenant d'une légumineuse, *Gliricidia sepium*, est la meilleure méthode pour reconstruire un complexe absorbant, tout en permettant des rendements de plus en plus proches de ceux des parcelles ayant reçu un amendement d'origine animale. Cette voie est d'autant plus intéressante que *Gliricidia sepium* peut facilement être produite par les paysans de la région. Elle contribuerait également à la conservation générale du bassin versant.*

MOTS CLÉS : Amérique centrale — Sols volcaniques — Matière organique — Amendements organiques — Complexe absorbant — Capacité d'échange — Réhabilitation des sols — Érosion hydrique — Glissement de terrain.

ABSTRACT

REHABILITATION OF VOLCANIC SOILS DEGRADED BY ANTHROPIC EROSION
WITH DIFFERENT TYPES OF ORGANIC FERTILIZERS IN EL SALVADOR (CENTRAL AMERICA)

*The soils over quarternary volcanic ashes of cultivated slopes of the mountains of El Salvador (Central America) have almost disappeared due to erosion. Among the actions taken for rehabilitation we propose the reconstruction of soils by incorporating different types of organic fertilizers. This reconstruction is controled experimentally over seven plots of 400 m² installed on farmers land. The results are analysed by considering together corn yield, the erosion, and the pre-soils evolution following the amount of organic matter and the capacity of cationic exchange. The most efficient treatment over the corn yield is the incorporation of 15 t/ha/year of chicken manure. The most profitable treatment for the farmer, still acceptable for the erosion, the best for reconstructing the adsorbing complex is an incorporation of 18 t/ha/year of fresh vegetative matter coming from the green manure of *Gliricidia sepium*.*

KEYWORDS : Central America — Volcanic soils — Organic matter — Organic fertilizers — Absorbing complex — Exchange capacity — Soil rehabilitation — Water erosion — Landslide.

RESUMEN

REHABILITACIÓN DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS DEGRADADOS CON ABONOS ORGÁNICOS
(EL SALVADOR, AMÉRICA CENTRAL)

Numerosos suelos diferenciados sobre cenizas y pumitas volcánicas del cuaternario en El Salvador (América central) han desaparecido debido a una erosión fuerte de origen antrópico. En la época actual, se restauran esos materiales incorporando abonos orgánicos de diferentes orígenes. Se observan la evolución de las tasas de materia orgánica y la reconstitución de un complejo absorbente sobre siete parcelas experimentales de 400 m² en el área rural. Durante los primeros años, el tratamiento más interesante para el maíz fue las deyecciones de gallinas, pero hoy en día parece que la introducción de materia vegetal fresca proveniente de una leguminosa *Gliricidia sepium* es la más capaz de reconstituir un complejo absorbente mientras permite obtener rendimientos cada vez más cercanos a los de las parcelas tratadas con un abono de origen animal. También es interesante esa introducción de *Gliricidia sepium* en el suelo porque esa planta puede ser producida fácilmente por los campesinos de la región. También contribuye a la conservación general de la cuenca hidrográfica.

PALABRAS CLAVES : América central — Suelos volcánicos — Materia orgánica — Abonos orgánicos — Complejo absorbente — Capacidad de cambio — Rehabilitación de suelos — Erosión hídrica — Deslizamientos de tierras.

INTRODUCTION

Le Salvador est un pays de l'isthme centro-américain (fig. 1) qui abrite 5 millions d'habitants sur une superficie de 21 000 km². Depuis une quinzaine d'années, la sur-exploitation des sols aux environs de la capitale a dépassé le seuil de durabilité des systèmes agraires. En effet, les troubles qu'a connus le pays furent à l'origine de déplacements de population du nord vers le sud, et particulièrement dans la région de Tonacatépequé, objet de notre étude. La paix règne depuis 1992 mais seule une partie des « déguerpis » a regagné son Nord d'origine. Aussi la densité de population reste-t-elle très forte dans la zone considérée et elle dépasse probablement 500 habitants au kilomètre carré. Dans les pires situations, les produits vivriers de base (maïs et haricot) se cultivent directement sur des cendres et ponces volcaniques, sur des pentes pouvant atteindre 45 %.

L'opération de recherche, dont les premiers résultats sont résumés ici, s'inscrit dans un vaste programme régional et interinstitutionnel (CEL-MAG-Catie-Usaid) (1) intitulé « Réhabilitation du sous-bassin versant de la rivière Las Cañas ».

Nos collègues y mettent en œuvre, avec le concours des populations locales, différents moyens de restauration, qu'il s'agisse d'aménagements physiques (fossés de drainage associés à des talus enherbés ou arborés, *Gliricidia sepium* et divers fruitiers), de reforestation, de correction de torrents ou encore d'actions sociales auprès des femmes

pour un jardinage proche de l'habitation, pour une amélioration de l'hygiène, et surtout la construction de foyers domestiques (*estufas-lorena*) économisant 40 % de bois de chauffage, pour ne citer que les actions les plus visibles.

Dans ce même programme, nous nous sommes investis dans une action de réhabilitation des sols à partir de cendres et ponces volcaniques en utilisant différentes sources de matière organique disponibles localement.

Les premières reconnaissances (contacts avec les paysans et avec les instances locales, étude des sites possibles, des sols, levé topographique, etc.) se sont déroulées de fin 1990 à mi-1991. L'installation du dispositif a duré jusqu'à fin 1991. Les résultats présentés ici proviennent des cycles culturaux 1992, 1993, 1994 et en partie 1995. Cette opération devait se terminer fin 1995.

OBJECTIFS

Selon la CEL, le sous-bassin de la rivière Las Cañas (superficie de 76 km²), affluent du río Acelhuaté (733 km²), puis du río Lempa, fournit à lui seul 25 % des sédiments qui comblent peu à peu le « Cerrón Grande », qui est le plus grand barrage de production hydroélectrique, au nord-ouest du Salvador (2 100 km²), avec un volume utile de 378 millions de mètres cubes. On y a calculé une sédimentation proche de 50 millions de tonnes par an. Cette sédimentation provient d'une érosion spécifique de 250 t/ha dans le grand bassin versant du río Lempa.

(1) CEL : Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (agence de bassin). MAG : Ministerio de Agricultura y Ganadería (Salvador). Catie : Centro Agronómica de Investigación y Enseñanza. Usaid : United States Agency for International Development.

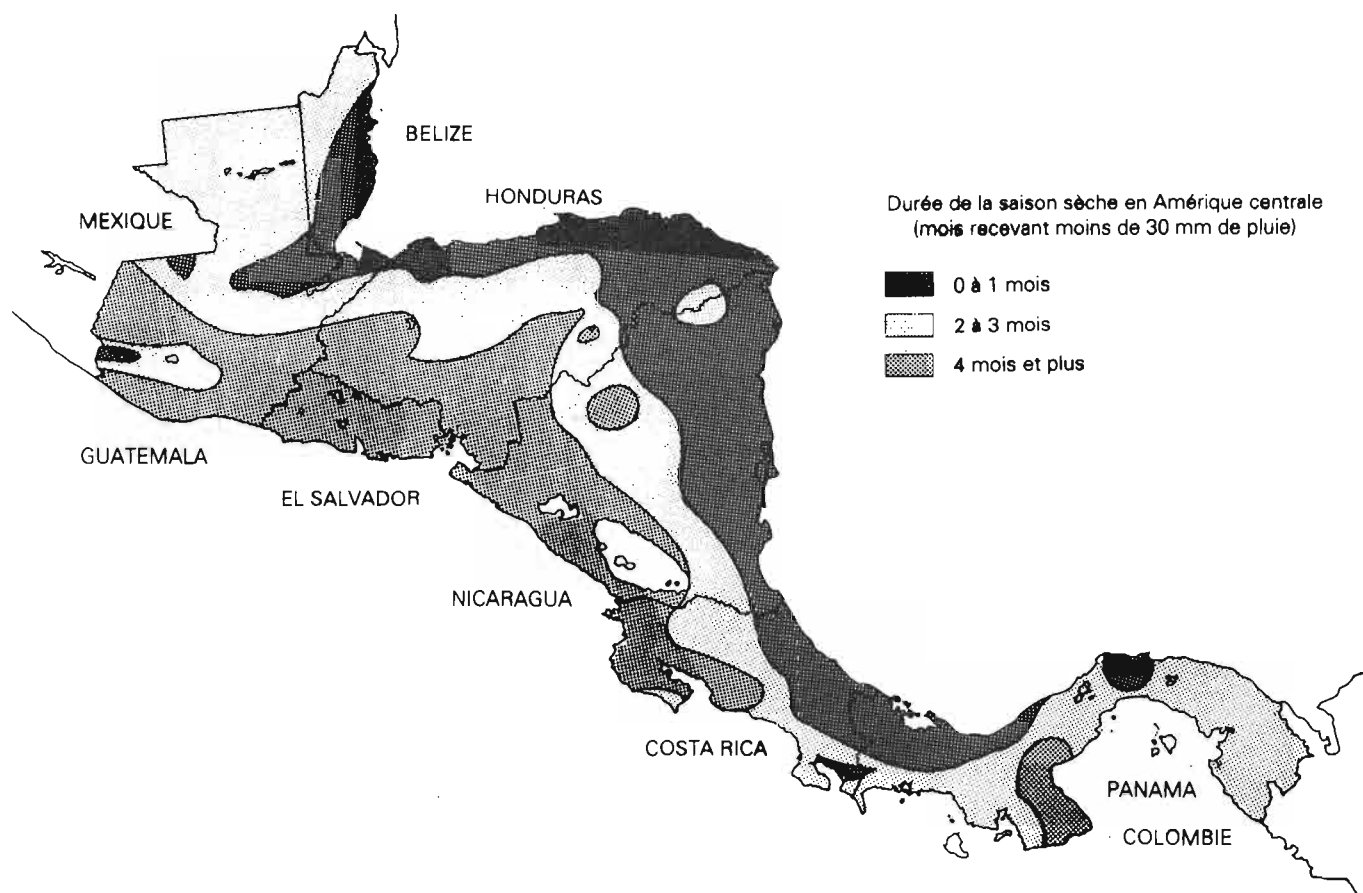


FIG. 1. — Carte de localisation du Salvador, climats en Amérique centrale.
Situation map of El Salvador, climates in Central America.

L'érosion spécifique du sous-bassin du río Las Cañas atteindrait, selon la CEL, des quantités allant jusqu'à 350 t/ha, valeurs compatibles avec celles calculées par CASTILLO (1992) et avec celles mesurées au champ (COLLINET et MAZARIEGO, 1993), comme on le verra plus loin. Il est certain que cette érosion fait partie des très fortes abrasions en cordillère volcanique d'Amérique centrale.

C'est dans ce contexte que notre opération s'est fixé les trois objectifs suivants :

- augmenter la productivité des terres en cultures vivrières pour diminuer la pression des populations paysannes sur les pentes les plus fragiles ;

- contribuer à une augmentation de la capacité de stockage hydrique des pluies par le bassin versant, tout en contrôlant l'équilibre entre les risques d'érosion par flux superficiels et ceux de glissement de terrain par surcharge hydrique profonde ;

- faire en sorte que les moyens proposés soient réalisés dans le contexte de l'actuel niveau d'investissement du

monde paysan salvadorien (produit par habitant, en 1990, de 521 dollars US).

LES MILIEUX NATURELS ET ANTHROPISÉS

Le diagramme de la figure 2 décrit un paysage disséqué dans 50 à 80 m de cendres, ponces et tufs provenant d'activités volcaniques du quaternaire.

Un des paroxysmes de l'activité volcanique à l'origine des cendres et ponces fut probablement l'explosion qui forma, il y a environ 15 000 ans, l'énorme caldeira de l'Ilopango, actuellement lac de cratère au sud-est de la capitale San Salvador. Les altitudes limites en amont et en aval du bassin versant vont de 700 m à 470 m, la zone étudiée se situant à 600 m. Dans ces cendres et ponces, il n'est pas rare de rencontrer d'anciens horizons organiques enterrés un peu plus cohérents que le reste des matériaux.

La zone étudiée appartient à la zone climatique tropicale semi-humide. Les précipitations annuelles atteignent

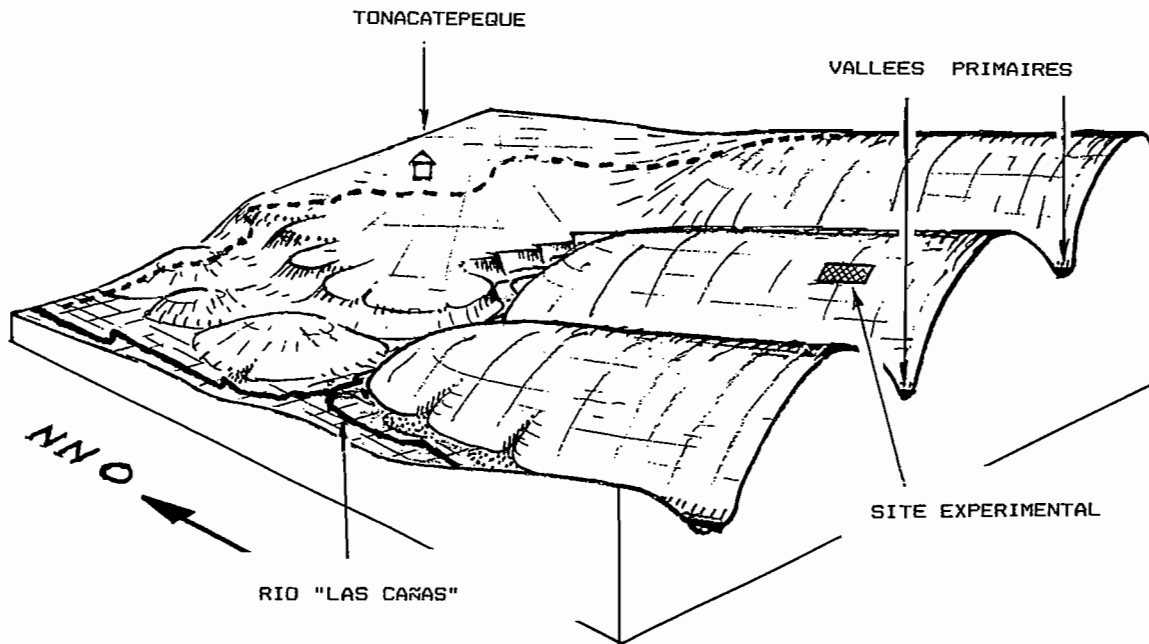


FIG. 2. — Bassin versant de « Las Cañas », paysages, localisation du site expérimental.
Drainage basin of « Las Cañas », landscapes, situation of the experimental site.

1 600 mm à Tonacatépequé, localité proche, où 80 % des pluies tombent entre mai et octobre. On note, environ une année sur trois, une nette diminution des précipitations en juillet. Ce phénomène dénommé localement « *canicula* » est particulièrement perturbant, dans toute l'Amérique centrale, pour les cultures qui sont alors en pleine croissance.

Sans une déforestation intense, cette région appartiendrait au climat « Forêt tropicale caducifoliées » (bmh-ST du système « *zona de vida* » de HOLDRIDGE, 1967). Selon MEDRANO (1990), l'utilisation actuelle de la terre dans ce bassin versant du río Las Cañas est la suivante :

- 18 % de zones urbanisées et d'eaux libres ;
- 38 % de zones cultivées dont 11 % de caféières et de plantations fruitières, 5 % de canne à sucre, 22 % de

maïs et haricot (tabac très fluctuant d'une année sur l'autre) ;

- 19 % de friches et pâturages ;
- 25 % de galeries forestières sur les pentes supérieures à 50 % et dans les ravins.

Les zones les moins déclives (pente inférieure à 15 %) correspondent au plateau de Tonacatépequé (fig. 2) et aux crêtes des collines allongées. Elles représentent environ 50 % du bassin et supportent des sols peu érodés, le plus souvent cultivés par les autochtones en parcelles de 1,50 ha à 2,75 ha. Ce sont des vitrosols ou des andosols eutriques (Vitric ou Umbric Andosols de la FAO ; Ustivitrands ou Haplustands de l'USDA), brun sombre, épais, meubles, homogènes sur au moins 150 cm. Quelques informations analytiques sont présentées dans le tableau I (COLLINET et MEDRANO, 1991).

TABLEAU I
 Andosols eutriques des plateaux et versants peu pentus, friche à *Gliricidia sepium*
*Eutric andosols in plateaux and gentle slopes, fallow land with *Gliricidia sepium**

	A	L	S	MO	C/N	pH	CEC	Sat.	CaMg/K	P total	P Olsen
5 cm	20	30	50	5,4	11	6,1	15,5	87	10	450	35
25 cm	35	20	45	2,4	11	6,0	16,0	77	7	325	16

A = argile, L = limon, S = sable (%) ; MO = matière organique (%) ; CEC = capacité d'échange cationique (cmol (+)/kg sol) ; Sat. = taux de saturation du complexe absorbant (%) ; CaMg/K = équilibre Ca + Mg par rapport K ; P total = phosphore total (mg/kg sol) ; P Olsen = phosphore Olsen (mg/kg sol).

L'autre moitié de la superficie correspond aux versants dépassant 15 % de pente, qui sont généralement cultivés, sinon cultivables, jusqu'à des pentes atteignant 80 % près des « urbanisations précaires ». On y trouve des sols squelettiques à peu évolués régosoliques (Eutric Regosols de la FAO ; Ustarents à Ustropepts de l'USDA). L'épaisseur de ce qui est un sol est insignifiante à faible au-dessus des cendres ou des ponces du matériau originel qui affleure dans plus de 30 % des cas.

Cette situation provient de la combinaison d'érosions en nappe ou concentrée et de réajustements des versants aux profondes incisions torrentielles par érosion régressive et glissements de terrain latéraux. Cette zone est surtout exploitée par les « déguerpis » allochtones en parcelles de 0,5 à 1,5 ha.

Quelques caractères analytiques de ce second groupe de sols sont résumés dans le tableau II.

TABLEAU II
Sols squelettiques ou peu évolués d'érosion sur cendres et ponces, pentes de 25 à 35 %, maïs, haricot
Skeletal or weakly developed soils formed by erosion on ashes and pumices, slopes from 25 to 35 % maize, bean

	A	L	S	MO	C/N	pH	CEC	Sat.	CaMg/K	P total	P Olsen
5 cm	10	25	65	0,6	-	5,5	8,0	62	6	350	13
25 cm	15	30	55	0,4	-	5,6	10,0	62	9	250	5

A = argile, L = limon, S = sable (%); MO = matière organique (%); CEC = capacité d'échange cationique (cmol (+)/kg sol); Sat. = taux de saturation du complexe absorbant (%); CaMg/K = équilibre Ca + Mg par rapport K; P total = phosphore total (mg/kg sol); P Olsen = phosphore Olsen (mg/kg sol).

La comparaison des deux situations montre que l'érosion sur les versants est à l'origine :

- de l'apparition d'une texture limono-sableuse proche de celle du matériau originel ;

- de la disparition quasi totale des horizons organiques ; il faut en effet enlever environ 100 à 150 cm aux sols des zones moins déclives avant de retrouver les matériaux qui affleurent sur les versants ;

- d'une nette diminution de la capacité d'échange cationique ;

- d'une possible mise à l'affleurement d'horizons organiques fossiles de couleur café à noire, à peu près inertes chimiquement, mais entretenant une ascension capillaire intéressante en saison de transition du fait de textures plus fines.

billonnage plus succinct a lieu vers le début de juillet en même temps que l'épandage de quelque 80 à 100 kg/ha de sulfate d'ammonium sur les flancs des billons.

La succession maïs-haricot est la règle générale. Le maïs (hybride Centa H3 ou H5) est semé immédiatement après le labour vers la mi-mai, les cannes sont pliées (*doblado*) à environ 20 cm sous l'épi vers le 20 août tandis que sont semés en poquet, au bâton ferré (*estaca*), les haricots sur les flancs des reliquats de billon. Cela permet le séchage au champ du maïs, hors de portée des rongeurs, et l'utilisation des cannes comme tuteurs pour le haricot. Épis de maïs sec, donc désormais attaquables par les insectes, et gousses de haricot sont récoltés en même temps entre fin octobre et mi-novembre. Les paysans les plus aisés utilisent quelques produits dés herbants et phytosanitaires.

LES PRATIQUES CULTURALES TRADITIONNELLES

Le site expérimental, positionné sur la figure 2, est situé dans une des parties les plus dégradées de ce bassin versant, sur des pentes s'échelonnant entre 20 et 40 %, et sur des sols possédant à l'origine des caractéristiques correspondant à celles reprises dans le tableau II.

Le labour traditionnel se fait vers la mi-mai, avec deux bœufs tirant une araire qui griffe le sol sur une profondeur de 20 à 25 cm, selon un tracé approximativement isohypse. Les champs sont billonnés manuellement après la levée du maïs et un apport de 80 à 100 kg/ha d'engrais NPK (20-20-0). Le champ acquiert alors une rugosité régulière en billons de 85 à 110 cm d'écartement et de 25 à 30 cm de hauteur avant les premières fortes pluies. Un second

MÉTHODE

La méthode se fonde sur un suivi des évolutions des cultures (maïs, haricot) et des sols sur sept parcelles expérimentales de 400 m² installées en deux sites de 18 % et 30 % de pente, dans un champ de 1,5 ha appartenant à un paysan propriétaire qui effectue tous les gros travaux.

Deux parcelles (TEST) servent de témoins. Deux parcelles (ESTI) reçoivent 15 t/ha de fumier de poule enfoui à l'état sec à l'époque du labour. Ce fumier provient des nombreux élevages locaux de poulets approvisionnant les chaînes des restaurants populaires de la capitale.

Deux parcelles (MVFE) reçoivent 18 t/ha de fragments, secs à 30 %, de rameaux et feuilles de *Gliricidia sepium* (« Madreado » ou « Madre cacao » au Salvador), légumineuse arbustive servant jadis de plante d'ombrage dans les

caféières et qui a proliféré. FASSBENDER (1987) estime que ce végétal peut produire 8 à 10 t/ha/an de fragments utilisables au bout de cinq ans.

Une parcelle MVFS, sur le site dont la pente est de 30 %, reçoit la même quantité du même matériel végétal, mais cette fois épandu superficiellement après le semis du maïs.

Le protocole expérimental prévoit différentes opérations dont la nature et la fréquence durent s'adapter aux moyens du laboratoire d'analyse du Catie et à une disponibilité partielle pour cette opération. On effectue, tous les deux mois, des prélèvements agronomiques d'échantillons de terre à trois profondeurs, par trois sondages dans trois placettes de 4 m² tirées au sort dans chaque parcelle de 400 m². Les trois échantillons des prises à 0-10, 15-25, 30-40 cm sont regroupés pour chaque parcelle. Deux fois l'an, on procède également à des prélèvements de végétaux (épis, grains, gousses, tiges).

L'objectif, adapté au milieu et aux conditions du travail, est donc un suivi des effets des traitements sur les différentes parcelles et dans le temps :

— à court terme, c'est l'effet immédiat, dès le premier cycle de culture, où l'on peut espérer une amélioration sensible des rendements grâce aux éléments nutritifs N et P apportés par la matière organique et immédiatement utilisables ; il n'y a jamais de carence potassique dans ce type de matériau ;

— à moyen terme, probablement en trois ou quatre cycles, on devrait constater la construction d'un complexe d'échange par le suivi de la capacité d'échange cationique et des relations qui la lient aux taux de matière organique

et d'argiles (granulométriques) ; l'augmentation espérée, année par année, permettra non seulement de maintenir les éléments libérés par l'altération des cendres, mais aussi d'éviter le lessivage des quelques engrais minéraux apportés ;

— à long terme, il s'agit de la construction d'une structure dans le néo-sol par l'adjonction de composés organiques, la réactivation de la faune du sol, avec des résultats espérés sur la porosité et la stabilité des agrégats, donc sur le volet conservation physique *lato sensu*. Les premiers effets n'étaient guère attendus avant cinq cycles.

RÉSULTATS

Effets à court terme

Deux effets sont immédiats : sur les rendements, sur la protection contre l'érosion.

RENDEMENTS

Le tableau III donne les résultats des cycles 1992, 1993 et 1994 pour le maïs et 1993 pour le haricot.

Pour le maïs, les rendements dans les trois situations, ESTI, MVFE et MVFS, sont en constante augmentation depuis 1993. On note que la situation MVFE devient aussi intéressante que ESTI à partir de 1993. L'année 1994 a présenté un optimum pour les cultures du fait de l'absence de *canicula* petite saison sèche de juillet. Cela peut expliquer des rendements en 1994 particulièrement élevés sur les témoins TEST, ce qui occulte d'ailleurs l'augmentation particulièrement intéressante du rendement sur la parcelle MVFS.

TABLEAU III
Rendements du maïs en 1992, 1993, 1994 et du haricot en 1993, comparaison avec les témoins
Maize yields in 1992, 1993 and 1994, bean yield in 1993, comparison with controls

	Maïs 1992	Maïs 1993	Maïs 1994	Haricot 1993
TEST	2 170	3 904	5 522	1 850
ESTI	3 237 + 49%	5 585 + 43%	6 341 + 15%	1 500 - 19%
MVFE	3 023 + 38%	4 774 + 22%	7 346 + 33%	2 312 + 25%
MVFS	2 232 + 4%	4 234 + 8%	6 361 + 15%	2 425 + 31%

Rendement en kg/ha. Variété maïs H3, grains à 14 % de siccité.

TEST : témoin.

ESTI : fumier de poule enterré.

MVFE : fragments de *Gliricidia sepium* enterrés.

MVFS : fragments de *Gliricidia sepium* épandus en surface.

Pour le haricot, les rendements en MVFE et MVFS sont bons. On observe par contre un effondrement du rendement du haricot en 1993, les jeunes plants ayant été étouffés par les mauvaises herbes dont les semences furent apportées en même temps que le fumier de poule. Un passage en revue de la littérature permet d'évaluer dans quelles limites s'inscrivent ces résultats. On note, malheureusement, que les informations sont nettement plus fia-

bles en culture améliorée (la MAG et sa station Centa) qu'en culture traditionnelle où les rendements sont évalués assez approximativement (en sacs et dans un système d'unités locales parfois fluctuantes), sans appréciation de la siccité des récoltes. Concernant le maïs, MAG-CENTA (1988, 1989) indique, en culture traditionnelle, des rendements de 1 908 kg/ha, et environ 5 000 kg/ha en culture améliorée (variété H3). Dans la région « Amérique latine »,

le *World Resources 1990-1991* donne les rendements moyens « céréales » suivants : Amérique du Sud : 2 034 kg/ha ; Amérique centrale : 1 769 kg/ha.

L'amélioration des rendements est l'effet prévu par l'apport d'azote et de phosphore directement utilisables par la plante. Les teneurs en azote et en phosphore augmentent d'année en année (fig. 3) et les équilibres de ces deux éléments restent corrects dans la gamme d'acidité du sol. Cela est, évidemment, une conséquence directe de l'accroissement observé des taux de la matière organique des sols, qui sera abordé dans la partie traitant des effets à moyen terme.

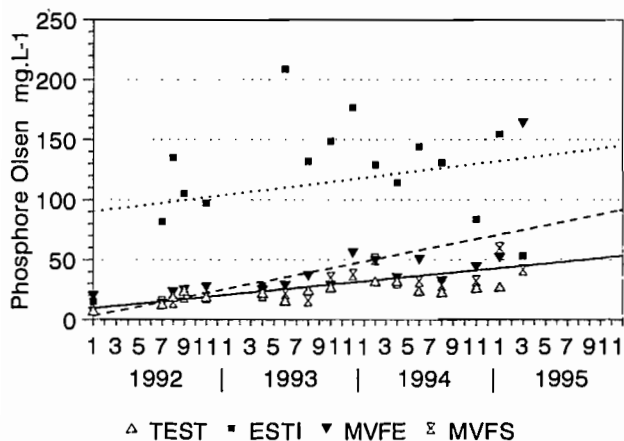


FIG. 3. — Évolution du phosphore Olsen.
Evolution of Olsen phosphorus.

PROTECTION CONTRE L'ÉROSION

L'amélioration des rendements n'est pas le seul effet intéressant, sur cendres volcaniques, des amendements organiques. Cette amélioration résulte aussi d'une augmentation de la dynamique de croissance des cannes et folioles, dès le mois de juillet sur les parcelles fumées ESTI. Elle est encore sensible sur MVFE mais moins nette sur MVFS. Cette augmentation de la dynamique de croissance, déjà effective lors des premières fortes précipitations de juin et juillet, assure une protection au niveau du sol contre l'énergie des pluies.

Dans la figure 4, on compare la mobilisation des terres en interbillons dans les quatre situations. La méthode permettant cette comparaison ne nécessite qu'une observation de terrain, à condition que celui-ci soit travaillé selon un motif répété, ce qui est notre cas.

On note immédiatement un effet protecteur important mais décroissant, dans l'ordre : ESTI > MVFE > MVFS > TEST.

Pour réaliser cette opération, on a besoin du poids de la terre détachée du billon et déposée dans chaque interbillon. Pour ce faire :

- on mesure le volume de terre accumulé interbillon par interbillon, soit : le côté de la parcelle (20 m ici) ; une évaluation codifiée de la densité des dépôts (0 à 3 pour 0 à 100 %) en créant une grille ; la mesure répétée (cinq fois sur 20 m) de la largeur du dépôt (c'est la seule opération qui nécessite un peu d'expérience pour différencier la partie remaniée de celle du sol labouré intact) ;

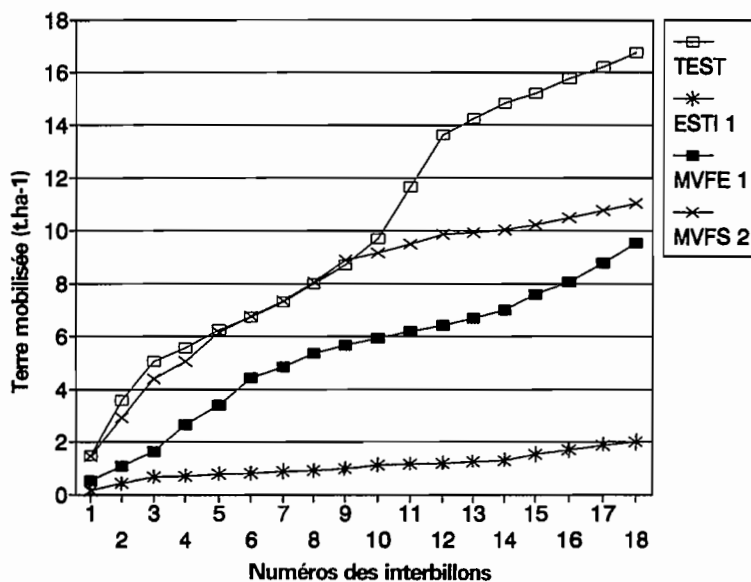


FIG. 4. — Mobilisation de la terre en interbillons.
Soil accumulation between ridges.

— on assimile ce volume à un parallélépipède rectangle ; cette approximation est suffisante pour la précision demandée ;

— avec la masse spécifique du sol, on passe du volume au poids, que l'on cumule interbillon par interbillon vers l'aval de la parcelle sur une distance tenant compte de l'équidistance du billonnage (ici : 18 à 19 billons dans 400 m²) ;

— on obtient une mobilisation de terre qui se rapproche donc plus d'une érosion potentielle que d'une érosion réelle.

On peut aussi évaluer l'érosion réelle, toujours dans les mêmes conditions de microreliefs ou de mésoreliefs en mailles répétitives, en suivant cette fois l'évolution d'une perte de volume des billons tout au long des averses tombant sur une surface peu protégée jusque début août, laps de temps pendant lequel se réalise 80 % de l'érosion annuelle, la couverture devenant ensuite très dense : mensuration des hauteurs, largeurs, fréquences des billons et interbillons dès la fin du premier buttage ; répétition de cette mesure tous les deux mois, par exemple.

On tentera, lors du prochain cycle, de substituer à ces mesures un coefficient qui est le rapport entre la longueur d'une chaîne développée librement selon la ligne de plus grande pente sur quelques billons et interbillons et la même distance mesurée avec la chaîne tendue.

Dans la figure 5, on compare les masses de terre mobilisées avec l'érosion réelle observée sur la parcelle MVFS ayant reçu, jusqu'au 22 juin 1994, 249 des 1 603 mm des pluies annuelles. On note que cette érosion, avec ouverture de billons (150 t/ha pour MVFS 2), représente dix à quinze fois la mobilisation liée au splash

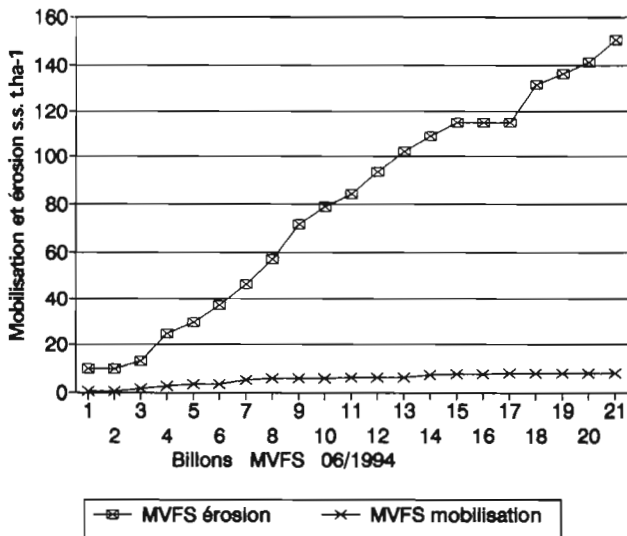


FIG. 5. — Érosion et mobilisation comparées des terres. Comparative soil erosion and accumulation.

et à une faible intervention de l'abrasion du flux hydrique se propageant latéralement dans des interbillons approximativement en courbe de niveau (10 t/ha sur la même parcelle). Ces chiffres, qui représentent des départs maximaux sur champ peu protégé de 30 % de pente, sont compatibles avec les données généralement publiées dans cette région.

Effets à moyen terme

La réhabilitation de ce néo-sol sur cendres et ponces passe par l'accumulation progressive de composés organiques. Si l'on admet que ceux-ci jouent un rôle positif dans l'édification du complexe d'échange, on peut alors espérer une augmentation progressive de la capacité d'échange du néo-sol. Ces effets à moyen terme ont été abordés selon deux niveaux d'analyse :

— à un premier niveau, on a supposé que l'hypothèse précédente pouvait être satisfaite ; aussi a-t-on suivi, les évolutions des éléments susceptibles d'interférer sur la capacité d'échange cationique (matière organique, argile, limon), et la capacité d'échange cationique elle-même (CEC) en fonction du temps ;

— à un second niveau, on vérifie la validité de l'hypothèse en faisant jouer les interactions entre les éléments dont on suppose le rôle dans l'amélioration de la capacité d'échange cationique. On analyse ainsi les relations CEC-argile, CEC-limon, CEC-matière organique et CEC-argile + matière organique.

ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

Un exemple d'évolution des taux de matière organique est donné dans les figures 6 et 7. Une information complète sur les tendances pour toutes les situations est rapportée dans le tableau IV (ligne matière organique-temps).

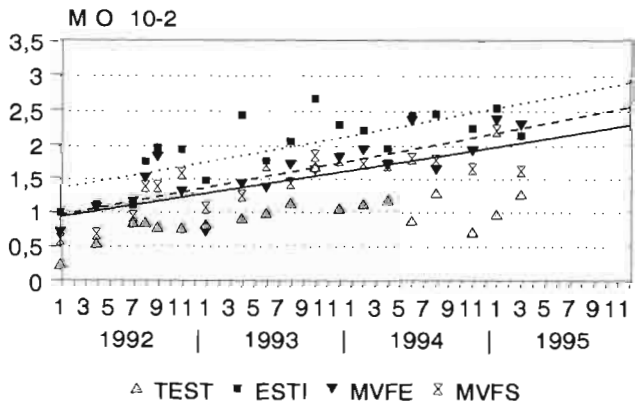


FIG. 6. — Évolution superficielle des taux de matière organique entre 1992 et 1995. Surface evolution of organic matter contents from 1992 to 1995.

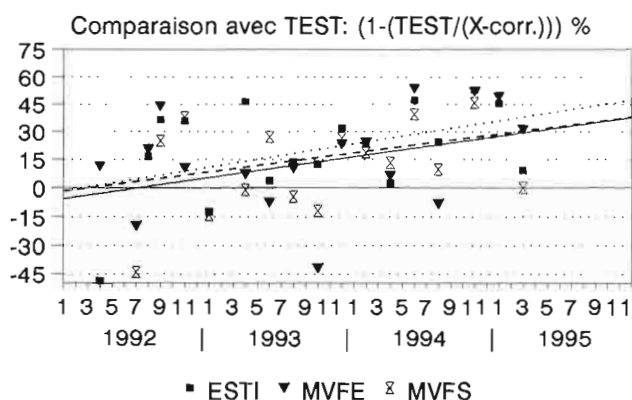


FIG. 7. — Évolution comparée avec le témoin du taux de matière organique entre 1992 et 1995.
Comparative evolution with the control of organic matter content from 1992 to 1995.

TABLEAU IV

Évolution des taux de matière organique (MO), d'argile granulométrique (AR) et de la capacité d'échange cationique (CEC) pendant 39 mois
Evolution of organic matter (MO), of grain-size clay contents (AR) and of the cation exchange capacity (CEC) during 39 months

Relation	Horizon (cm)	TEST 1 + 2	ESTI 1 + 2	MVFE1 1 + 2	MVFS 1 + 2
MO-temps	0-10	++	++	++	++
	15-25	+	0	+	++
	30-40	0	0	0	0
AR-temps	0-10	-	--	0	--
	15-25	-	0	0	0
	30-40	0	0	0	0
CEC-temps	0-10	-	+	0	-
	15-25	-	0	0	-
	30-40	-	0	0	+

Coefficient $r^2 > 0,300$: relation significative ++ ou --
 $0,100 < r^2 < 0,299$: tendance + ou -
 $r^2 < 0,099$: relation nulle 0

Sur 39 mois, les taux de matière organique augmentent en valeur absolue de 100 à 130 %, pour les vingt-cinq à trente premiers centimètres des parcelles ESTI, MVFE, MVFS. Il convient cependant de noter deux choses :

— les taux étaient particulièrement bas au départ : 0,3 à 0,7 % de matière organique sur les quinze premiers centimètres ;

— cette analyse n'indique qu'une tendance estompant les variations annuelles en limite de détection avec des prises d'échantillons bimestrielles, variations liées aux successions des apports, de la minéralisation, du lessivage des composés organiques récupérés (fumier) ou synthétisés.

Pour permettre des comparaisons entre une parcelle donnée et son témoin, des corrections sont nécessaires car les taux initiaux de matière organique des parcelles, avant leurs premiers traitements de 1992, étaient sensiblement différents.

Les comparaisons avec ces témoins (exemple de la figure 7) montrent, cette fois, des augmentations relatives de 30 à 35 % pour les dix premiers centimètres de ESTI, MVFE et MVFS.

Pour la tranche 15-25 cm, les taux n'augmentent que sur les parcelles ESTI et MVFE du premier site, un peu moins pentu.

Plus profondément (30-40 cm), les variations sont totalement indépendantes du temps, et ce pour des teneurs devenues faibles et comprises entre 0,2 et 0,7 % de matière organique.

L'accumulation progressive de composés organiques sur des cendres et la constitution de néo-horizons organo-minéraux est vérifiée au moins sur les premiers quinze à vingt-cinq centimètres au bout d'un peu plus de trois années d'essais.

ÉVOLUTION DE LA GRANULOMÉTRIE

Pour isoler le rôle que peuvent tenir les argiles, voire les limons, dans la construction du complexe d'échange, deux points ont été vérifiés : les modifications texturales avec le temps, ce que les travaux des champs pourraient finalement laisser supposer ; les interactions entre la CEC et les argiles et limons (elles seront analysées plus loin).

Les éventuelles modifications texturales reposent sur une évaluation correcte des situations initiales par parcelle. Or l'interprétation des cartes d'isovaleurs texturales par tranche de sol (logiciel Surfer) montre de sérieuses hétérogénéités liées à la présence d'horizons fossiles plus argileux pouvant affleurer du fait de l'érosion générale. Certes, cela se traduit par des effets intéressants pour l'hydrodynamique car les cultures profitent manifestement de remontées capillaires plus importantes et durables à l'aplomb de ces « taches » à texture plus fine. Malheureusement, cela entraîne également une plus grande complexité dans l'interprétation des données.

L'analyse des variations granulométriques des argiles et des limons avec le temps ne donne que peu d'informations durables — si ce n'est la détection d'une érosion en nappe — sur les parcelles TEST 1, ESTI et MVFS 2 (tabl. IV, ligne argile-temps). Il est certain que ce processus est omniprésent mais il est également vraisemblable que ses effets peuvent être soit amplifiés (fig. 8), soit atténués (fig. 9) par des « remontées » d'horizons fossiles de texture plus fine ou plus grossière.

On pourra donc difficilement tirer argument de ces évolutions granulométriques, apparemment aléatoires, pour l'interprétation des variations de la CEC liées aux colloïdes.

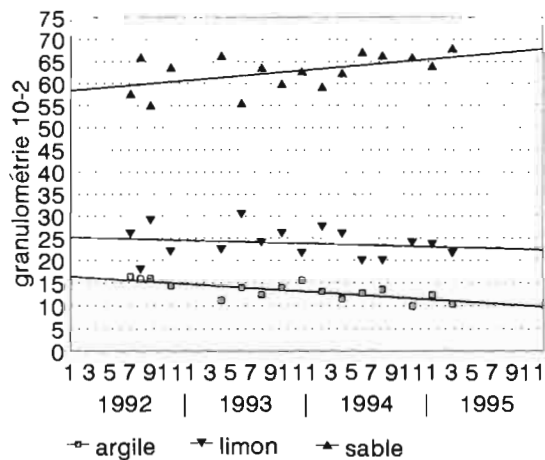


FIG. 8. — Évolution des textures entre 1992 et 1995, exemple de la parcelle ESTI.
Evolution of textures from 1992 to 1995, example of the ESTI plot.

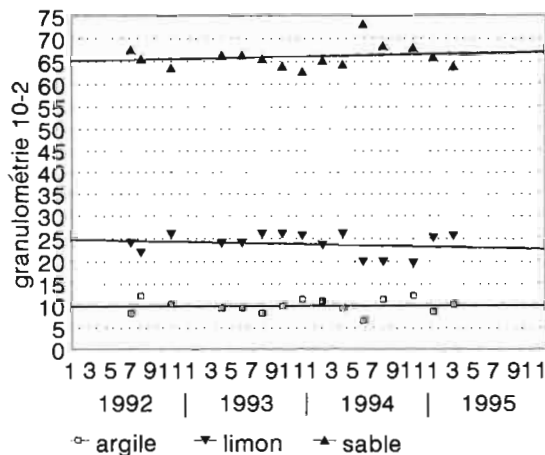


FIG. 9. — Évolution des textures entre 1992 et 1995, exemple de la parcelle MVFE.
Evolution of textures from 1992 to 1995, example of the MVFE plot.

ÉVOLUTION DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE

Les CEC initiales de ces matériaux variaient de 8 (surface) à 10 cmol(+)/kg de terre (profondeur), valeurs faibles rappelant celles d'anciens sols ferrallitiques désaturés de pénéplaines intertropicales.

On peut espérer, plus à long terme qu'à moyen terme, faire remonter ces CEC jusqu'aux valeurs de sols non dégradés sur les mêmes matériaux, à savoir atteindre 15 à 16 cmol(+)/kg de terre.

Sans pouvoir miser sur des variations significatives des taux d'argile, mais avec la seule croissance, observée précédemment, des taux de matière organique, on devrait

observer une amélioration de la CEC avec le temps, si toutefois les composés organiques synthétisés influent positivement sur la construction d'un complexe d'échange.

L'hypothèse d'une nette remontée de la CEC avec le temps n'est pas réellement vérifiée, ce que montrent les exemples des figures 10 et 11, ainsi que les tendances apparaissant dans le tableau IV (ligne CEC-temps).

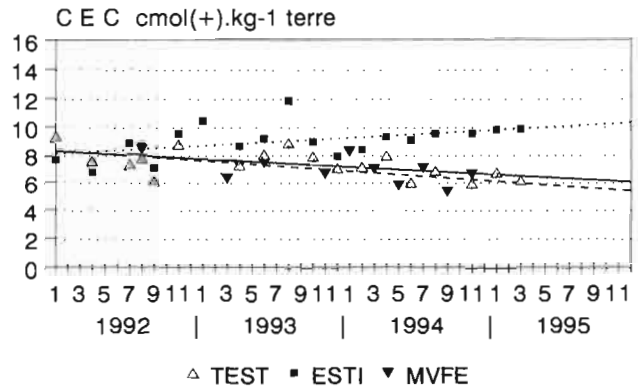


FIG. 10. — Évolution de la capacité d'échange de plusieurs parcelles, en surface, entre 1992 et 1995.
Evolution of exchange capacity in all plots from 1992 to 1995 at a shallow depth.

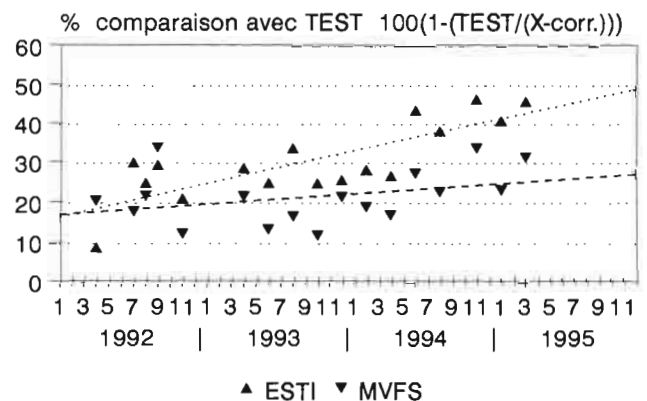


FIG. 11. — Évolution comparée avec le témoin des capacités d'échange de plusieurs parcelles, en surface, entre 1992 et 1995.
Comparative evolution with the control of exchange capacities in all plots from 1992 to 1995 at a shallow depth.

Seules les surfaces des parcelles ESTI montrent une amélioration de cette capacité d'échange cationique avec le temps.

Tout au long des 39 mois, la CEC diminue significativement sur les parcelles TEST ne recevant que les maigres résidus de récolte abondamment pâturés à partir du mois de novembre.

On ne constate généralement pas ou peu de modifications de la CEC sur les parcelles MVFE, quelle que soit la profondeur. Dans ce dernier cas, il faut donc considérer que, comparé au témoin, ce traitement permet au moins de maintenir un complexe absorbant en son état initial.

VÉRIFICATION DES INTERACTIONS

Relation entre CEC et taux d'argile et de limon

Les exemples des figures 12 et 13 ainsi que le tableau V (ligne CEC-argile) montrent une croissance très significative et générale (sauf ESTI, 0-10 cm) de la capacité d'échange cationique avec les taux d'argile. Cela est classique en ce qui concerne le rôle des argiles ; la participation des limons à l'accroissement de la CEC l'est moins.

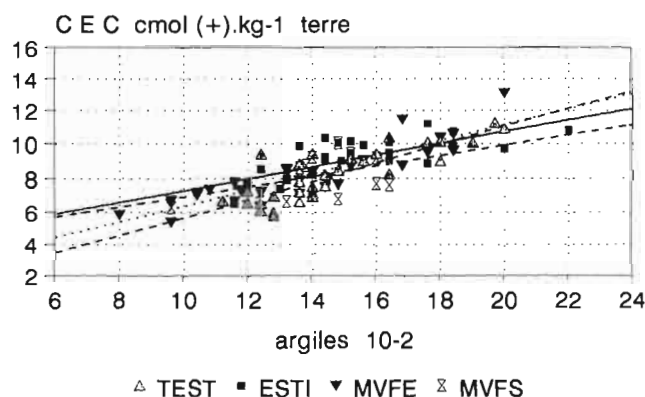


FIG. 12. — Relation entre la capacité d'échange et le taux d'argile, pour toutes les parcelles, entre 15 et 25 cm. Relation between the exchange capacity and clay in all plots, from 15 to 25 cm deep.

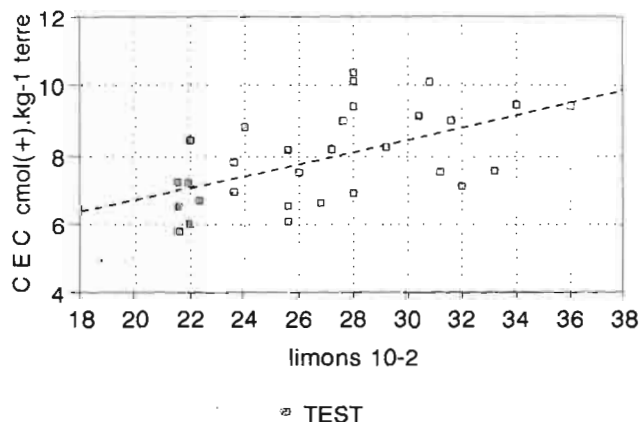


FIG. 13. — Relation entre la capacité d'échange et le taux de limon. Relation between the exchange capacity and loam.

TABLEAU V

Analyse des relations liant la capacité d'échange cationique (CEC) aux argiles (ARG), à la matière organique (MO) sur toutes les parcelles et pour toutes les profondeurs
 Analysis of the relations between the cation exchange capacity (CEC), clays (ARG) and organic matter (MO) in all plots and at all depths

Relation	Horizon (cm)	TEST 1+2	ESTI 1+2	MVFE1 1+2	MVFS 1+2
CEC-AR	0-10	++	-	++	+
	15-25	++	++	++	++
	30-40	++	++	++	++
AR-MO	0-10	-	+	+	0
	15-25	-	-	0	-
	30-40	--	-	-	+

Coefficient $r^2 > 0,300$: relation significative ++ ou --
 $0,100 < r^2 < 0,299$: tendance + ou -
 $r^2 < 0,099$: relation nulle 0

Sans autres possibilités d'analyser les limons, nous supposons qu'une partie de ces limons « actifs », provenant de cendres et ponces volcaniques, possède une surface spécifique importante, qui leur permettrait soit de participer directement à l'édification d'un complexe d'échange, soit de le faire en accueillant des composés électriquement chargés.

L'absence de relation nette, voire une tendance négative sur les parcelles ESTI, 0-10 cm contenant les plus forts taux de matière organique (1,6 à 2,7 %), oppose un premier démenti à l'hypothèse de l'additivité des CEC des composés minéraux et organiques. Ce qui suggère la possibilité, pour ce type de matériau et pour ce type d'amendement, d'une action inhibitrice possible des composés humiques synthétisés à partir de fumiers, sur les sites d'échanges électro-négatifs des argiles, voire des limons « actifs ».

Relation entre CEC et taux de matière organique

Les variations de la capacité d'échange cationique en fonction du taux de matière organique (fig. 14 et 15 ; tabl. V, ligne CEC-matière organique) ne suivent pas les évolutions communément observées sur des sols évolués. On distingue en effet deux comportements selon le taux de matière organique :

— pour des taux inférieurs à 1,2 %, une nette diminution des CEC ;

— pour des taux supérieurs à 1,2 %, soit une indépendance de la CEC (parcelle MVFS), soit une augmentation plus ou moins sensible de celle-ci (ESTI et MVFE) avec l'accroissement du taux de matière organique.

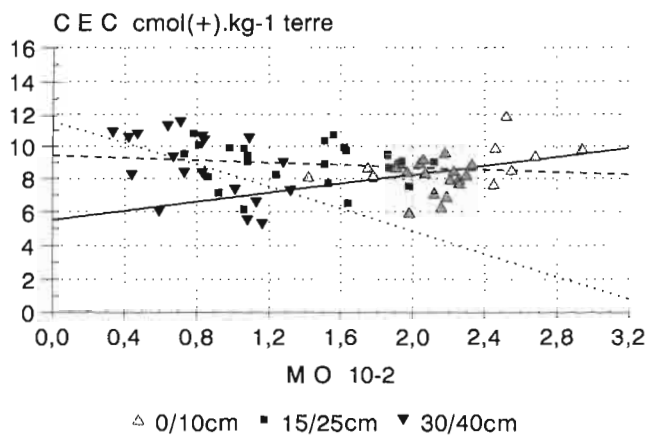


FIG. 14. — Relation entre la capacité d'échange et la matière organique, en surface, exemple de la parcelle ESTI.
Relation between the exchange capacity and the organic matter, example of ESTI plot, at a shallow depth.

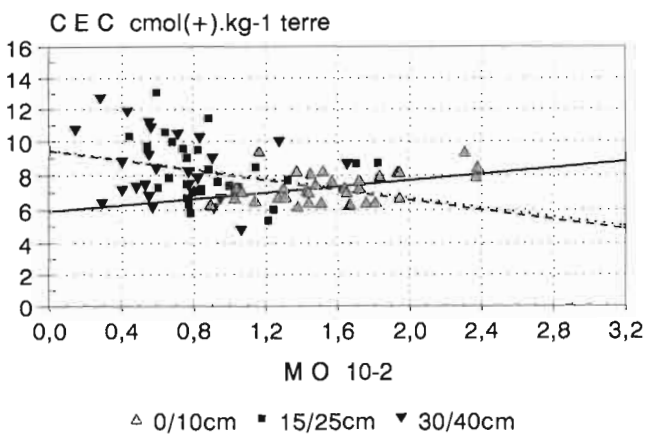


FIG. 15. — Relation entre la capacité d'échange et le taux de matière organique, en surface, exemple de la parcelle MVFE.
Relation between the exchange capacity and organic matter, example of MVFE plot at a shallow depth.

NOUVELLES HYPOTHÈSES

En résumé, la combinaison des deux niveaux d'analyse livre les enseignements suivants :

- en trois ans et demi, l'accumulation de matière organique est importante jusqu'à environ – 20 cm dans les parcelles amendées ;

- cette accumulation ne se traduit cependant par une augmentation de la capacité d'échange qu'en surface des parcelles ESTI et MVFE, à condition que celles-ci contiennent plus de 1,2 % de matière organique ;

- on note, par contre, un effet négatif de cette matière organique sur la capacité d'échange dans les horizons dont les taux de matière organique sont inférieurs à 1,2 % ;

- comme, d'une part, les relations CEC-argile, voire CEC-limon, sont hautement significatives et positives, que, d'autre part, les horizons à faible taux de matière organique sont les horizons profonds, et qu'enfin les taux d'argile augmentent avec la profondeur, il apparaît que les composés humiques synthétisés dans les horizons superficiels ont un rôle faiblement constructeur de complexe d'échange mais que les composés profonds ont un rôle fortement inhibiteur.

Ce comportement des composés humiques rappelle certaines des conclusions de travaux déjà anciens, ou plus récents, réalisés par BOISSEZON (1970) et BOISSEZON *et al.* (1991) sur la capacité d'échange d'autres types de sols. On retrouve en effet :

- une non-additivité probable des capacités d'échange des composés des deux origines, minérale et organique, pour pouvoir évaluer celle d'un complexe organominéral ;

- un blocage possible des sites d'échange des argiles soit par des précurseurs d'acides humiques, soit par des hydroxydes d'aluminium (altération actuelle des cendres ou héritage des gels allophaniques de sols enterrés ?) ;

- une inhibition des sites d'échange de la phase minérale qui paraît plus importante en profondeur des parcelles ayant reçu des matières d'origine animale ; elle est moins importante sur les parcelles où sont enfouis des fragments de végétaux frais (MVFE).

De nouvelles voies de recherche s'ouvrent donc pour confirmer ou infirmer ces hypothèses. Pour cela, de nouvelles actions sont déjà, ou seront, entreprises en fonction des possibilités du laboratoire d'analyses de sols et végétaux du Catie :

- fractionnement classique des composés organiques et analyse de la distribution des différentes fractions en fonction de leur site dans le sol et des origines animale ou végétale de la matière organique ;

- isoler le rôle des composés organiques dans la construction du complexe d'échange (par calcination de la matière organique) ;

- estimer la distribution des stocks organiques en analysant la terre totale, en prenant donc en compte les graviers de ponce (FELLER *et al.*, 1989), en comparant les teneurs pour chaque fraction granulométrique.

Effets sur le long terme

Les effets sur le long terme ne sont pas encore tous perceptibles, sauf ceux se traduisant par une réorganisation structurale d'horizons initialement minéraux et pulvérulents. Cette réorganisation, en cours sur toutes les parcelles, est plus active sur les parcelles recevant des matières végétales fraîches (MVFE et MVFS). Elle conduit au développement d'une macroporosité dans un matériau qui n'était jusqu'alors que microporeux et à l'augmentation de la cohésion interéléments, puis interagrégats, ce qui

permet d'éviter une érosion superficielle par « flottage » d'éléments dont la masse spécifique est inférieure à l'unité (sables et graviers de ponce).

On observe déjà, surtout dans les situations MVFE et MVFS, une structuration peu à moyennement développée en agrégats subanguleux à ronds qui traduit une reprise d'activité biologique, notamment celle des lombricidés depuis mi-1994.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Argumentation scientifique

L'incorporation d'amendements organiques dans des matériaux d'origine volcanique, tels que cendres et ponces, augmente significativement les rendements des cultures vivrières de base, comme le maïs et le haricot.

Ces incorporations permettent de *reconstruire un sol* en restaurant lentement un complexe absorbant et en réédifiant une structure, mais la vitesse et l'efficacité de ces reconstructions dépendent du type d'amendement organique utilisé. Depuis le début des essais, les deux types d'amendement ont eu des effets différents, essentiellement en relation avec les taux de matière organique du sol que ceux-ci ont, plus ou moins rapidement, permis d'atteindre :

— en partant de taux initiaux de quelque 0,7 % de matière organique, les matières d'origine animale (ESTI) permettent d'obtenir plus rapidement un enrichissement organique des horizons supérieurs des sols, ce qui se traduit par des effets plus rapidement intéressants sur les rendements ; un enrichissement équivalent n'est obtenu qu'au bout d'un an et demi par l'enfouissement de produits d'origine végétale (MVFE avec *Gliricidia sepium*) ;

— la construction du complexe d'échange ne semble commencer qu'à partir d'une accumulation d'environ 1,2 % de matière organique ; en deçà de ce taux, les composés synthétisés à partir des deux origines de matière organique (ESTI et MVFS) inhibent cette construction ;

— les informations sur le rôle des résidus épandus en surface (MVFS) sont moins nombreuses mais l'intérêt de ce traitement semble devenir proche, au bout de trois ans et demi, de celui de MVFE.

Finalement, la situation MVFE est presque aussi intéressante que la situation ESTI pour une réhabilitation par amendements organiques des sols dégradés différenciés sur cendres et ponces volcaniques du bassin versant de Las Cañas.

Argumentation socio-économique

Si l'on met en avant, cette fois, des préoccupations socio-économiques, on doit préconiser les traitements MVFE ou MVFS d'enfouissement ou d'épandage de fragments végétaux de *Gliricidia sepium* (seule légumineuse

essayée), pour des raisons ou des intérêts qui se manifestent à deux échelles.

À l'échelle du champ, ce sont des raisons stratégiques qu'il faut invoquer :

— il ne se produit pas suffisamment de fumier de poule chez les paysans pour un amendement autonome des champs, le fumier doit être acheté dans les élevages semi-intensifs ;

— comme les parcelles sont éloignées des lieux de production, le transport du fumier est une opération coûteuse (main-d'œuvre) et pénible, la traction animale ne pouvant être utilisée sur des versants trop pentus ;

— la fourniture des produits d'origine animale reste incertaine car soumise aux aléas économiques ; la pérennité de notre chaîne d'approvisionnement en fumier dépend en effet de celle de la production des poulets de la région de Tonacatéppéqué vers les restaurants populaires de San Salvador !

Compte tenu des arguments scientifiques développés précédemment, le choix d'amendements d'origine végétale est donc une voie judicieuse. Comment mener cette production de façon réaliste ?

Une agroforesterie incorporant des rideaux arbustifs ou arborés dans le champ lui-même ne convient pas car les parcelles sont trop petites pour perdre davantage de superficie et les rideaux de légumineuses arbustives n'ont pas prouvé, en Amérique centrale de cordillère volcanique, leur utilité dans le cadre de l'amélioration de la fertilité du sol (LEBEUF *et al.*, 1994). On observe toujours une baisse de rendement sensible des vivriers qui y sont associés, celle-ci ne pouvant être palliée que par un apport important d'engrais minéraux, ce qui n'est pas envisageable ici.

La fabrication de compost, prévue jadis, se heurte à deux problèmes : six mois de sécheresse surviennent au moment où l'on dispose de résidus végétaux (cannes, folioles de maïs, fanes et autres résidus des aires de battage), ce qui rend difficile le démarrage de toute fermentation ; 75 % de ces résidus sont consommés par le bétail, plus ou moins parqué dans les champs en saison sèche.

Il est, en revanche, possible de reconstruire ou d'épaissir tant soit peu les clôtures arbustives ou arborées souvent plantées dans ce pays pour leur adjoindre le rôle de bandes productrices de matière végétale fraîche. *Gliricidia sepium* et *Erithrina fusca* peuvent en effet produire de 8 à 10 t/ha/an de matière fraîche à partir de cinq ans. La clôture arborée élargie d'une parcelle de 1,5 ha pourrait déjà fournir, à proximité immédiate, environ 50 % de l'amendement organique frais nécessaire. Le complément peut être obtenu en plantant les portions trop déclives et les bords de ravins non cultivables, toujours proches des champs cultivés dans ces zones défavorisées.

À l'échelle du terroir, donc du bassin versant, nous n'avons certes pas changé radicalement les habitudes des

paysans de Tonacatépequé ; l'un d'entre nous a en revanche obtenu des réorientations : les semis de *Gliricidia sepium* font tache d'huile depuis la fin de 1994. À un profit individuel voulu et compris (augmentation immédiate des rendements) s'ajoute un profit pour la communauté vivant sur ce bassin, à savoir une réelle conservation intégrée du bassin versant.

L'aspect négatif de la pression démographique et de la « surprenante » distribution des terres aboutissant à ces parcelles exigües est, pour une fois, contrebalancé par la transformation des versants de toute cette zone vulnérable en une mosaïque de barrières arbustives et arborées semi-naturelles. Celles-ci ne seront plus uniquement utiles comme source de matière végétale fraîche mais elles interviendront aussi dans la protection générale du bassin versant contre deux types de dégradations :

— celles occasionnées par les flux hydriques superficiels (érosion en nappe, érosion linéaire) ;

— celles de glissements possibles de terrain (COLLINET et SANCHEZ ESCOTO, 1993).

Ce second effet résulte, d'une part, de l'évapotranspiration des arbres extrayant des surcharges hydriques occasionnelles sur des pentes et matériaux très poreux où les tensions latérales peuvent dépasser la cohésion interne ; d'autre part, de l'ancrage de ces matériaux par le système racinaire profond.

Finalement, on est amené à évoquer le problème plus général de la conservation des sols très poreux et peu cohérents d'origine volcanique où le dilemme est le sui-

vant : faut-il favoriser l'infiltration ou faut-il favoriser le ruissellement ?

La réponse ne doit être donnée qu'en l'argumentant sérieusement par la connaissance de l'articulation des causes et des effets probables jouant dans le milieu considéré. Il n'était, par exemple, pas opportun de creuser l'important réseau de fossés de drainage sur des versants cendreaux et très pentus car les infiltrations qu'ils provoquent, au cœur de la saison des pluies, ne peuvent pas être reprises par une couverture végétale encore trop insuffisante. Les risques de surcharges hydriques profondes, critiques, deviennent alors excessifs. Dans ce contexte bien spécifique, et seulement dans ce contexte, les fossés de drainage auraient dû suivre et non précéder la réhabilitation biologique du versant.

D'autres exemples recevraient certainement d'autres réponses, cela pour répéter que, malheureusement pour l'aurole des « savants », les problèmes de la gestion durable des sols et des eaux ou de la réhabilitation des sols ne connaîtront jamais une solution universelle mais toujours des réponses sectorielles, adaptées aux intensités des causes, aux échelles de risque acceptables. Il faut se faire à l'idée que la meilleure connaissance possible des processus pédologiques et hydrologiques ou des comportements agronomiques, que la meilleure modélisation possible ne permettront jamais de s'abstenir d'une consultation du terrain et de l'utilisation qu'en font ses occupants pour avoir le droit de préconiser tel ou tel type de gestion, telle ou telle réhabilitation.

BIBLIOGRAPHIE

- BOISSEZON (P. DE), 1970 — Étude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 8 (4) : 391-418.
- BOISSEZON (P. DE), BELLIER (G.), BRION (J.-C.), GAVINELLI (E.), FARDOUX (J.), 1991 — Capacité d'échange cationique provenant de l'enfouissement de pailles de luzerne dans le sol. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26 (3) : 263-280.
- CASTILLO AGUILAR (V. M.), 1992 — *Estimación de la erosión del suelo al nivel de cuenca utilizando análisis espacial y percepción remota en El Salvador*. Tesis Maestría, Catie, Turrialba, 69 p.
- COLLINET (J.), MAZARIEGO (M.), 1993 — *Restauración de suelos degradados volcánicos utilizando abonos orgánicos. Microcuenca del río « Las Cañas » (El Salvador). Primeros resultados*. Turrialba, Catie, 29 p.
- COLLINET (J.), MEDRANO (R.), 1991 — *Diagnósticos, potencialidades y factores limitantes de algunos de los sistemas de suelos representativos de una sub-cuenca del río Las Cañas (El Salvador)*. Turrialba, Catie, 49 p.
- COLLINET (J.), SANCHEZ ESCOTO (O. A.), 1993 — *Determinación del riesgo de derrumbe en la cuenca del río Reventado (Cartago, Costa Rica, América Central)*. Turrialba, Catie, 16 p.
- FELLER (C.), BALESSENT (J.), CHEVIGNARD (T.), LACOEUILHE (J.-J.), 1989 — Préparation d'échantillons riches en ponces volcaniques en vue de l'étude de leur stock organique. Application à des sols cultivés en ananas (Martinique). *Fruits*, 44 (7-8) : 385-391.
- FELLER (C.), FRITSCH (E.), POSS (R.), VALENTIN (C.), 1991 — Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest en particulier). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26 (1) : 25-36.
- HARTSHORN (G. S.) *et al.*, 1982 — *Country environmental profile, a field study (Costa Rica)*. Tropical Science Center, Usaid mission of Costa Rica, 123 p.
- HOLDRIDGE (L. R.), 1967 — *Life zone ecology*. San José, Tropical Science Center, 206 p.
- HOLDRIDGE (L. R.) *et al.*, 1971 — *Forest environments in tropical life zone. A pilot study*. London, Pergamon Press, 747 p.

- LEBEUF (T.), COLLINET (J.), KASS (D.), FAUSTINO (J.), 1994 — *Modelación de la conservación de suelos en cultivos en cajellones y normas de distanciamiento para suelos volcánicos*. Turrialba, Catie, 13 p.
- PRAT (C.), 1991 — *Étude du Talpetate, horizon volcanique induré de la région Centre pacifique du Nicaragua. Genèse, caractérisation morphologique, physico-chimique et hydro-dynamique, son rôle dans l'érosion des sols*. Thèse doct., univ. Paris-VI, 350 p.
- QUANTIN (P.), ZEBROWSKI (C.), DELAUNE (M.), HIDALGO (C.), 1992 — El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México) : loess o cinéritas. *Terra*, 10 (num. esp. : « Suelos Volcánicos Endurecidos » : 178-182.

Restauration des sols volcaniques par apport de matières organiques au Salvador dans le bassin versant de Las Canas : 187-201

Photos : J. Collinet



Paysage de collines recouvertes de sols fertiles sur cendres volcaniques. On remarque à l'avant-plan le versant raide cultivé en tabac sur billons isohypses.



Colline mise en culture au-dessus d'un fossé d'absorption totale des eaux de ruissellement. Fond de vallée en V densément arboré.



Versant raide labouré par des bœufs tirant une araire. Cette technique culturale ne permet pas d'enfourer totalement les herbes de la jachère : les mottes ainsi protégées par les racines résistent mieux à la battance des pluies.



État de surface du sol cendré restauré par apport de matières organiques : début de structuration en juin 1993, à l'issue de trois cultures (MNFS).