

Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Equateur

Georges DE NONI (1) et Marc VIENNOT (1), Germain TRUJILLO (2)

(1) Mission ORSTOM, Apartado 6596 CCI, Quito, (2) Ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Elevage, Quito

RÉSUMÉ

L'ORSTOM et le ministère de l'Agriculture de l'Equateur, après avoir réalisé une carte générale des principaux processus d'érosion, ont développé un programme de mesures de l'érosion dans la partie andine du pays sur des sites représentatifs choisis à partir de cette carte. De 1981 à 1984, les études ont porté sur 5 parcelles de 50 m² puis, à partir de 1986, sur 4 stations constituées de parcelles de 100 m² (parcelles témoins des conditions locales et parcelles nues gérées selon le protocole de « Wischmeier ») couplées avec des parcelles améliorées de 1 000 m² où sont testées des méthodes de conservation. Les résultats, bien que préliminaires, sont originaux pour ce type de milieu encore mal connu. Ils révèlent que les poids de terre perdue peuvent être considérables (par ex. 421 t/ha/an à Ilalo) mais aussi la forte irrégularité interannuelle des manifestations érosives (par ex. 16 fois plus d'érosion, d'une année sur l'autre, à Mojanda sur une parcelle « Wischmeier »). Des interprétations conventionnelles sont proposées pour mettre en relation les pertes en terre avec les différents facteurs pouvant l'occasionner. On souligne le rôle de l'IM 15, les conditions particulières d'érodibilité des sols volcaniques et l'importance des façons culturales. Enfin, les résultats sont encourageants pour le développement agricole : sur les parcelles améliorées, l'érosion et les effets du ruissellement sont systématiquement moindres (< 1t/ha/an) et les rendements y sont également meilleurs.

MOTS-CLÉS : Mesure — Parcille — Ruissellement — Erosion — Erosivité — Erodibilité — Sol volcanique — Conservation — Andes — Equateur.

ABSTRACT

MEASURES OF EROSION WITHIN THE ANDES OF ECUADOR

ORSTOM and the Ministry of Agriculture of Ecuador, after having made a general map of erosion, have developed a program of measures of the erosion within the Andean part of the country on representative places chosen in terms of this map. Since 1981 until 1984, the studies has been carried out on 5 plots of 50 m² then starting in 1986 on 4 erosion resorts composed of plots of 100 m² (according to local conditions and Wischmeier's protocol) and on 6 experimental plots of 1 000 m² endowed with methods of conservation. The results, even though preliminary, are models for this type of environment still not well known. They reveal that the weights of the soil lost can be considerable (i.e. 421 t/ha/yr in Ilalo) but also the strong yearly irregularity of the erosive demonstrations (i.e. 16 times more erosion from one year to another in Mojanda on one plot « Wischmeier »). Conventional interpretations are suggested in order to relate the soil losses with the different factors than can cause it. We emphasize the function of IM 15, the particular conditions of erodibility of the volcanic soils and the importance of cultivation practices. Finally, the results are encouraging for the agricultural development : on the experimental plots, the erosion and the effects of runoff are systematically less (< 1t/ha/yr) and the yields are also better.

KEY WORDS : Measure — Plot — Runoff — Erosion — Erosivity — Erodibility — Volcanic soil — Conservation — Andes — Ecuador.

RESUMEN

MEDICIÓN DE LA EROSIÓN EN LOS ANDES DE ECUADOR

El ORSTOM y el Ministerio de agricultura del Ecuador, después de haber realizado un mapa general de los principales procesos erosivos, han desarrollado un programa de mediciones de la erosión sobre sitios representativos escogidos en base a este mapa. De 1981 hasta 1984, los estudios se realizaron sobre 5 parcelas de 50 m² y luego, a partir de 1986, sobre 4 estaciones compuestas por parcelas de 100 m² (parcelas testigos de las condiciones locales y parcelas manejadas según el protocolo de Wischmeier) asociadas con parcelas mejoradas de 1 000 m² donde se experimentan métodos de conservación. Los resultados, todavía preliminares, son originales para este tipo de medio aún mal conocido. Estos revelan que los pesos de tierra perdida pueden ser considerables (por ej. 421 t/ha/año en Ilalo) pero también la gran irregularidad inter-anual de las manifestaciones erosivas (por ej. 16 veces más de erosión, de un año a otro, en Mojanda sobre la parcela « Wischmeier »). Proponemos interpretaciones convencionales para correlacionar las perdidas de tierra con los diferentes factores explicativos. Se nota el papel de la IM 15, las condiciones particulares de erodibilidad de los suelos volcánicos y la importancia de las prácticas culturales. Por fin, los resultados son alentadores para el desarrollo agrícola : sobre las parcelas experimentales provistas de métodos de conservación, la erosión y los efectos del escurrimiento son sistemáticamente menores (< 1t/ha/an) y los rendimientos son también mejores.

PALABRAS CLAVES : Medición — Parcela — Escurrimiento — Erosión — Erosividad — Erodibilidad — Suelo volcánico — Conservación — Andes - Ecuador.

INTRODUCTION

De 1974 à 1984, l'ORSTOM, dans le cadre d'une convention de coopération scientifique avec le ministère de l'Agriculture et de l'Elevage de la république d'Equateur, a participé à la réalisation d'un inventaire cartographique qui a donné lieu à l'élaboration de plusieurs centaines de cartes. Ces recherches ont été particulièrement détaillées (échelle de travail : 1/50 000) dans la partie andine du pays, appelée localement « Sierra », qui est un milieu géographique original caractérisé par sa situation équatoriale, son relief de haute montagne et une forte densité d'agriculteurs. Les travaux de COLMET-DAAGE (1978) sur les sols, et de GONDARD (1981-1983) sur les types d'utilisation agricole de ceux-ci, ont permis de mieux connaître les éléments qui composent ce milieu et de souligner le rôle de l'érosion qui constitue l'un des facteurs limitants majeurs à l'accroissement de la production agricole. Parmi les manifestations de l'érosion, les processus engendrés par le ruissellement concentré prédominent (DE NONI, 1982).

Il est vrai que les zones agricoles de la Sierra constituent un milieu très sensible à l'érosion où l'homme a dû forcer la nature pour s'installer. La cordillère des Andes, qui traverse le centre du pays selon une direction méridienne, est une formidable barrière montagneuse aux fortes pentes. Sa présence confère au climat des caractéristiques tempérées qui interfèrent avec la circulation générale des masses d'air en zone équatoriale. Il s'agit en fait d'un régime équatorial de montagne.

Les Andes sont divisées ici en 2 cordillères parallèles (4 000-4 500 m) qui dominent une étroite dépression (1 500-3 000 m) formée par une succession de bassins d'effondrement. Chaque cordillère est couronnée par de hauts volcans enneigés (les « nevados ») qui dépassent les 5 500 m et qui sont responsables de l'épaisse couche de cendres fossilisant une grande partie de la Sierra.

La dépression, ou couloir interandin, occupée très tôt par les sociétés précolombiennes, se caractérise par sa topographie irrégulière (0-50 %) et des sols très érodés. Entre 2 000 et 3 000 m, le maïs associé au haricot et le pâturage prédominent. Entre 1 500 et 2 000 m, les cultures irriguées apparaissent (canne à sucre, arbres fruitiers, arachide...). A partir de 3 200 m, les hautes terres andines commencent. Jusqu'à 4 000 m, c'est le domaine privilégié de la pomme de terre, de l'orge, de la fève, de la quinoa, du lupin et plus localement de l'oignon. Entre 4 000 et 4 400 m, avant les affleurements rocheux et les neiges pérennes, les cultures sont progressivement remplacées par un élevage ovin extensif. Ce milieu est en pleine mutation depuis une vingtaine d'années : une petite agriculture (le *minifundio*) s'y est densément installée quelles que soient les pentes (voire même jusqu'à plus de 100 %) et a provoqué une accélération spectaculaire de l'érosion (DE NONI, VIENNOT, 1985).

C'est sur ces deux principales régions naturelles de la Sierra, le couloir interandin et les hautes terres, que nous avons concentré pour l'instant les études sur l'érosion et la conservation des sols en Equateur (voir carte de localisation, fig. 1).

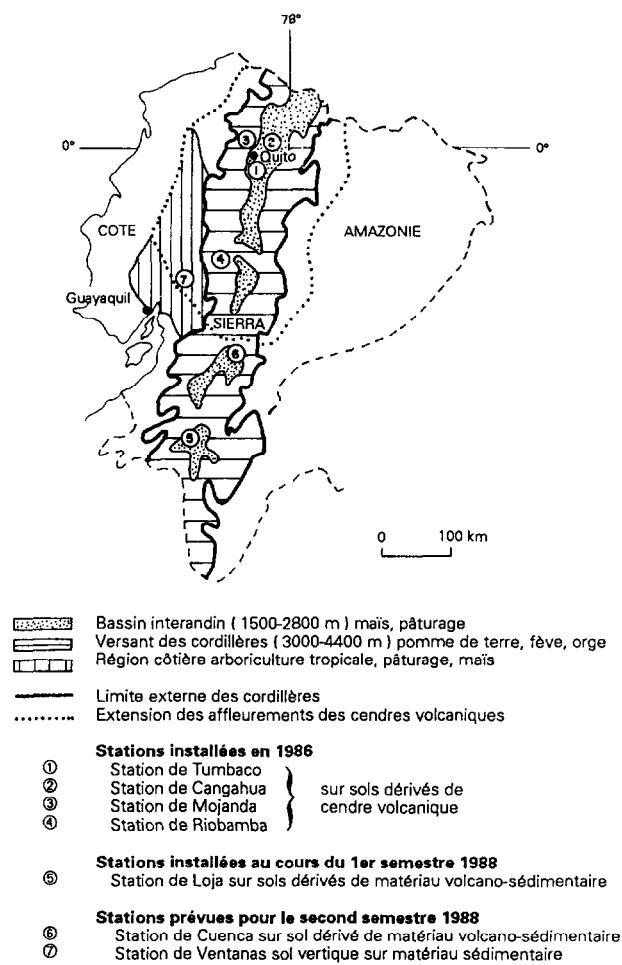


FIG. 1. — Localisation des stations.
Stations localization.

1. LA MÉTHODE DE TRAVAIL : EXPÉRIMENTATION ET DÉMONSTRATION

1.1. La première génération d'études : cartographie et petites parcelles

La démarche de notre recherche s'est basée au départ sur une approximation des phénomènes par la cartographie. Ceci a donné lieu à la réalisation d'une carte, à l'échelle de 1/1 000 000, des principaux processus d'érosion sévissant en Equateur (ALMEIDA, DE NONI *et al.*, 1984). Cette carte a permis d'évaluer l'importance géographique des zones affectées par l'érosion (près de 50 % de la surface du pays) et de souligner la prédominance de l'érosion hydrique par ruissellement ; une grande partie des problèmes érosifs se localisent dans le couloir interandin et sur les versants des deux cordillères. Cependant, quelle que soit l'échelle

cartographique considérée, cette approche reste exclusivement descriptive et ne permet pas de répondre aux questions fondamentales suivantes : quels sont les facteurs d'érosion discriminants, quelles sont les périodes critiques de l'année, etc.? Face aux limitations de la cartographie dans ce domaine, nous avons été conduits à installer un réseau de petites parcelles de ruissellement.

Entre décembre 1981 et juin 1984, nous avons procédé au suivi de cinq parcelles de ruissellement de 50 m² (10 m × 5 m). Elles étaient localisées sur des zones érodées critiques de la province de Pichincha, à proximité de Quito, la capitale du pays. Deux parcelles furent installées sur des portions de versant, en patûrage extensif ; quant aux trois autres, elles furent l'objet d'une observation agronomique et soumises à divers traitements culturaux traditionnels sans aucune intervention en matière de conservation des sols. Pour la période considérée, les résultats ont été spectaculaires et pour l'une des cinq parcelles, en monoculture de maïs, l'érosion a dépassé 600 t/ha.

Ce type d'étude revêtait un caractère pionnier pour l'Equateur comme pour l'ensemble de la montagne andine où les recherches sur ce thème sont relativement discrètes. A cet égard, on ne peut mentionner que les résultats de l'« Association des planteurs de café de Colombie ». Par exemple, celle-ci indique des pertes en terre inférieures à 2 t/ha/an sous café, fluctuant de 30 à 40 t/ha/an sous végétation herbacée plus ou moins continue et comprises entre 200 et 800 t/ha/an pour la culture du maïs.

Face à ces premiers résultats qui nous permettaient de mieux comprendre les mécanismes de l'érosion et à l'objectif principal du projet orienté vers l'accroissement de la production grâce à la lutte antiérosive, nous avons été conduits à modifier et à élargir notre méthode de travail. Les parcelles individuelles de 50 m² ont été remplacées par des parcelles plus grandes groupées sous forme de stations qui sont utilisées comme site d'expérimentation et de démonstration au service de l'agriculteur.

1.2. Les stations actuelles

Elles sont constituées de parcelles de ruissellement témoins et expérimentales directement implantées chez le paysan. Chaque station est équipée systématiquement par deux types de parcelles de 100 m² de surface : parcelle nue travaillée selon le protocole de Wischmeier (WISCHMEIER et SMITH, 1978) et parcelle témoin des cultures et pratiques locales. En outre selon les stations, une ou deux parcelles expérimentales de 1 000 m² de surface ont été installées, sur lesquelles sont testées des méthodes simples de conservation. Parallèlement à la construction des parcelles, une enquête de terrain socio-agronomique a été réalisée pour déterminer dans la zone

d'influence des stations les conditions actuelles de l'agriculture : les différents types de cultures, pratiques et calendriers agricoles ; l'accent ayant été mis en particulier sur l'identification de méthodes de conservation. Sur la base de ces enquêtes, nous avons opté pour les ouvrages constitués de microbarrages perméables disposés selon les courbes de niveau (ROOSE, 1977). Considérant que les études se déroulent avec et chez l'agriculteur, les stations servent de centre de démonstration pour ce dernier.

Bien que l'échelle de travail actuellement à la mode soit celle du bassin versant, nous ne l'avons pas retenue parce que notre cadre de référence est le champ de l'agriculteur. En outre, l'étude stationnelle débouche sur la comparaison entre une situation témoin et un état expérimental amélioré ; ceci est impossible au niveau du bassin versant où l'hétérogénéité des conditions naturelles et humaines est importante. Cependant, une fois l'expérimentation terminée sur les stations, les acquis pourront être transposés dans le cadre de bassins versants.

Face aux engagements contractuels d'une recherche pour le développement et considérant, par ailleurs, les facteurs limitants liés à une infrastructure locale non préparée à ce type d'étude, nous avons été obligés parfois d'adapter les protocoles conventionnels. On peut à ce sujet faire les commentaires suivants :

— Avec un budget plus important, toutes les parcelles auraient dû avoir 1 000 m² de surface ce qui aurait permis des comparaisons plus satisfaisantes. Nous avons préféré ne pas accroître les risques d'hétérogénéité du terrain et ne pas gêner l'agriculteur en sollicitant une surface trop importante.

— Les observateurs sont des étudiants en agronomie dont la présence sur le terrain est parfois irrégulière ce qui rend très difficile l'interprétation de quelques résultats (cumul de plusieurs pluies et problème de gardienage). Par ailleurs les prélèvements sont effectués systématiquement après la pluie, il résulte que les différentes manipulations sont soumises à un protocole contraincant (prise d'un échantillon composite d'eau avec des sédiments en suspension et pesée de la terre accumulée sur le fond des bacs) ; enfin le problème d'étanchéité et d'horizontalité des bacs avec partiteurs, dont le tarage constitue un aspect primordial est souvent négligé entre prélèvements.

— A la demande du laboratoire équatorien des sols qui est déjà très sollicité, on ne prélève qu'un seul échantillon d'eau et de sédiments par parcelles ce qui représente tout de même près de 1 000 échantillons par an.

2. LES RÉSULTATS GLOBAUX

2.1. Les parcelles de 50 m²

Ce sont de petites parcelles de ruissellement de 50 m², pourvues d'un seul bac à sédiments de 2 m³. Elles nous ont permis d'obtenir les premières données chiffrées sur l'érosion dans les Andes équatorielles (DE NONI, NOUVELOT, TRUJILLO, 1985 et 1986). Les cinq parcelles étaient situées dans un rayon d'une trentaine de kilomètres autour de Quito et affectées par des processus de ruissellement concentré. De décembre 1981 à juin 1984, les résultats ont été les suivants :

— A Alangasi, au sud-est de Quito, deux parcelles ont été installées sur un sol noir limono-argileux, de 30 à 40 cm d'épaisseur, développé sur une couche de cendre indurée appelée localement « Cangahua » (Duriudoll de la USDA, 1975). Une parcelle, sur une pente de 26 %, a été soumise à la succession culturale suivante : maïs, pâtrage et jachère (période interculturelle en friche, d'une durée de quatre mois environ) ; l'érosion mesurée a été de 62 t/ha. L'autre parcelle se trouvait à quelques dizaines de mètres à côté de celle-ci, sur une pente de 28 %, non cultivée et avec une couverture végétale discontinue (cangahua avec petits îlots de sol noir) ; l'érosion a été de 314 t/ha.

— A Ilalo, à l'est de Quito, deux parcelles ont été également aménagées sur un sol sablo-limoneux dérivé de projections volcaniques, de 60 à 80 cm d'épaisseur (Durustoll). Une parcelle sur 33 % de pente, a été cultivée en maïs pendant toute la période considérée et a été le siège d'une forte érosion ; 631 t/ha. Une autre parcelle non cultivée (cangahua très indurée sans sol), sur 30 % de pente, a mieux résisté et n'a perdu que 71 t/ha.

— A Calacali, au nord de Quito, une seule parcelle, cultivée en maïs, a été l'objet d'un suivi sur un sol volcanique sableux avec de nombreuses petites pierres ponces (Psamment), de 60 à 80 cm d'épaisseur, sur une pente de 35 %. En moyenne, l'érosion y a été faible, équivalente à 4 t/ha/an ; cependant une seule pluie de forte intensité, 70 mm/h en 15 et 30 minutes, a provoqué 594 kg de perte en terre pour 50 m², soit 119 t/ha. Au total, pour les 3 ans, l'érosion a été de 123 t/ha dont 119 t/ha pour la pluie signalée ci-dessus.

A la lecture de ces données, on constate que les pertes sont considérables. On peut souligner aussi l'irrégularité interannuelle des manifestations érosives. Pour la période considérée, c'est l'année 1982 qui a été la plus catastrophique.

2.2. Les stations expérimentales et démonstratives

Les résultats globaux correspondent à 4 stations — 2 dans le bassin interandin (Tumbaco et Cangahua) et 2 sur les versants de la cordillère (Mojanda et Rio-

TABLEAU I
Pertes en terre sur les parcelles de Alangasi et Ilalo (1981-1984)
Soil wearing off from plots

ALANGASI		ILALO		
	Parcelle avec divers traitements	Parcelle nue sol noir + cangahua	Parcelle avec maïs	Parcelle nue sur cangahua
1981-84	62 t/ha	314 t/ha	631 t/ha	71 t/ha
1982	58 t/ha/an	204 t/ha/an	421 t/ha/an	58 t/ha/an

bamba) — pour les périodes allant de septembre 1986 à août 1987 et de septembre 1987 à avril 1988. Pour les stations de Cangahua et Mojanda, seules les moyennes des données obtenues sur les parcelles expérimentales ont été considérées parce que les résultats unitaires sont très proches. L'ensemble des résultats a été récapitulé sous la forme de tableaux en barres (voir fig. 2, 3, 4, 5), établis en fonction des pluies décadiques (pour chaque barre décadaire, on a noté également le nombre de pluies érosives) et des poids de terre perdue qui leur correspondent pour les 2 années considérées.

Les deux stations situées dans le bassin interandin, dont l'altitude est inférieure à 3 000 m, sont caractérisées par un climat équatorial d'altitude, tempéré chaud avec 2 saisons sèches et 2 saisons humides, où les températures mensuelles fluctuent de 18 à 22 degrés. Les résultats ont été les suivants :

— Pour la station de Tumbaco, 2 600 m d'altitude, culture du maïs associée au haricot et à la fève, 20 % de pente ; l'érosion a été de 1.2 t/ha pour 86-87 et de 0.4 pour 87-88 sur la parcelle expérimentale, 6.7 t/ha pour 86-87 et 42.2 t/ha pour 87-88 sur la parcelle témoin traditionnelle et 35.6 t/ha pour 86-87 et 82.8 t/ha pour 87-88 sur la parcelle « Wischmeier ».

— Pour la station de Cangahua, 2 800 m d'altitude, culture du maïs associée au haricot, 20 % de pente ; 0.4 t/ha pour 86-87 et 0.3 t/ha pour 87-88 en situation expérimentale, 3.8 t/ha pour 86-87 et 6.8 t/ha pour 87-88 sur le témoin et 56.1 t/ha pour 86-87 et 83.6 t/ha pour 87-88 sur la « Wischmeier ».

Les deux autres stations sont installées sur les hauts versants internes des cordillères, à une altitude supérieure à 3 200 m où le climat est équatorial d'altitude, tempéré froid avec des risques de gelée et des précipitations variant de 1 000 à 2 000 mm. Les résultats ont été les suivants :

— Pour la station de Mojanda, 3 300 m d'altitude, monoculture de l'orge, 40 % de pente ; 0.3 t/ha pour

86-87 et 0.2 t/ha pour 87-88 en situation expérimentale, 1.2 t/ha pour 86-87 et 0.5 t/ha pour 87-88 sur le témoin et 6.1 t/ha pour 86-87 et 96.9 t/ha pour 87-88 sur la « Wischmeier ».

— Pour la station de Riobamba, 3 250 m d'altitude, culture de la pomme de terre puis association orge-fève (orge semé à la volée plus lignes de fève, 80 × 60 cm), 20 % de pente ; 0.5 t/ha pour 86-87 et 7.6 t/ha pour 87-88 sur la parcelle expérimentale, 1.6 t/ha pour 86-87 et 52.2 t/ha pour 87-88 sur le témoin et 66.5 t/ha pour 86-87 et 189.7 t/ha pour 87-88 sur la « Wischmeier ».

On peut faire les remarques suivantes :

— L'irrégularité interannuelle des manifestations érosives : les résultats subissent des variations considérables d'une année sur l'autre ; c'est ainsi que par rapport à 86-87, on observe en 87-88, 16 fois plus de terre perdue à Mojanda et 7 fois plus à Tumbaco sur les parcelles « Wischmeier », 32 fois plus d'érosion à Tumbaco sur la parcelle témoin.

— C'est sur les parcelles de type « Wischmeier » que les pertes en terre sont maximales (de 6 à 66 t/ha) pour 86-87. Elles sont entre 5 fois à 10 fois moindres sur les parcelles témoins (de 1.2 à 6.7 t/ha) et entre 15 à 55 fois moindres sur les parcelles expérimentales (0.4 à 1.2 t/ha). Ceci est encore plus significatif pour l'année 87-88 pour laquelle les pertes en terre fluctuent de 82 à 189 t/ha sur la parcelle « Wischmeier ». Sur les tableaux en barre, le comportement de la parcelle « Wischmeier » (couleur noire) se détache nettement pour les 2 années d'étude. A l'inverse, les poids de terre des stations expérimentales sont moins élevés en 87-88 qu'en 86-87.

— Comme le démontrent les tableaux en barres, on constate pour les deux années considérées l'absence d'une époque érosive bien marquée dans l'année, bien qu'en règle générale les cinq pluies les plus érosives, sur un total d'une quarantaine de pluies érosives par année et par station, soient responsables d'une grande partie de l'érosion :

TABLEAU II
Rapport en pourcentage entre les 5 pluies les plus érosives et les poids de terre totaux perdus par année sur les parcelles témoins (T) et « Wischmeier » (W)
Soil percentage weared off annualy from reference plots and from Wischmeier plots

	TUMBACO		CANGAHUA		MOJANDA		RIOBAMBA	
	T.	W.	T.	W.	T.	W.	T.	W.
1986-87	90	85	90	94	67	78	55	83
1987-88	99	88	99	94	52	97	88	61

3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'interprétation des résultats se fera en deux temps. Dans cette partie, nous analyserons le rôle respectif de l'agressivité climatique et des caractéristiques d'érodibilité des sols en relation étroite avec le ruissellement. Nous réservons la partie 4 pour l'étude de l'influence du couvert végétal et des pratiques culturelles.

3.1. Agressivité climatique

L'interprétation des résultats obtenus sur les parcelles de 50 m² a mis en valeur que les relations sont plus étroites entre l'érosion hydrique du sol et l'intensité pluviale qu'avec la pluviométrie annuelle (FOURNIER, 1960). Par exemple, durant l'hiver 1982-1983, le phénomène climatique de « El Nino » a donné lieu à des hauteurs pluviométriques exceptionnelles (DE NONI, POURRUT, VIENNOT, 1987) ; cependant les pertes en terre n'ont pas augmenté systématiquement. Ainsi sur la parcelle de Alangasi, les variations des poids de terre pour cette période vont en sens contraire par rapport aux hauteurs pluviométriques observées. En effet de décembre 1981 à mai 1982, pour une période de retour des précipitations de 5 ans, l'érosion a été de 630 kg pour 50 m² ; de décembre 1982 à mai 1983, pour une période de retour des précipitations de 30 ans due au phénomène de « El Nino », les pertes en terre ont été de 450 kg. En outre,

il a été possible d'établir des droites de régression qui décrivent des relations satisfaisantes entre les poids de terre perdue et l'intensité maximale pour une courte durée de temps. Cependant, l'ajustement par les droites de régression s'est avéré délicat quant au choix de la durée de l'intensité maximale. L'IM 30, conventionnellement adoptée à la suite des travaux de WISCHMEIER et SMITH (1978) et ROOSE (1977) n'a pas pu être utilisée pour toutes les parcelles. Par exemple, pour la station de Ilalo proche de celle de Alangasi, c'est l'intensité maximale en 15 minutes qui permet d'établir les meilleurs ajustements. On peut penser que la précision dans la lecture des enregistrements pluviographiques, qui est fonction du type d'appareil utilisé, est à l'origine de cette différence. Le pluviographe de Ilalo, de rotation journalière, présente une échelle de temps de 16 mm/h, celui de Alangasi, de rotation hebdomadaire, est limité à 2,25 mm/h. Dans ce dernier cas, on comprendra qu'il est impossible de découper les intensités en intervalles de temps de 5 ou 15 minutes.

Les mêmes remarques peuvent être faites pour les quatre stations installées depuis 1986. Sur le tableau III, on a répertorié les données de poids de terre perdue en t/ha et la pluviométrie totale en mm pour les années 1986-1987 et 1987-1988 et pour la période allant de septembre à fin avril :

TABLEAU III
Pertes en terre et pluviométrie sur les stations expérimentales (1986-1988)
Soil wearing off and rainfalls of the applied stations

STATIONS	ANNEE 1986-87				ANNEE 1987-88			
	Pmm	Ex.	T.	W.	P mm	Ex.	T.	W.
TUMBACO	478	1,08	3,02	12,9	457	0,42	42,18	82,82
CANGAHUA	366	0,45	3,8	56	308	0,33	6,89	83,6
MOJANDA	588	0,38	1,15	5,9	547	0,19	0,52	96,94
RIOBAMBA	537	0,43	1,44	56,9	532	7,6	52,2	189,7

En analysant de plus près ce tableau, on constate que pour des hauteurs pluviométriques comparables entre les 2 périodes considérées, l'érosion a donné lieu à des poids de terre dont les variations annuelles sont considérables, à l'exception des parcelles expérimentales. Ces variations sont systématiques sur les parcelles nues, les poids de terre pour l'année 1987-1988 sont multipliés par 6 à Tumbaco, par 1,5 à Cangahua, par 16 à Mojanda

et par 3 à Riobamba. Mis à part la station de Mojanda, les variations sont également significatives sur les parcelles témoins. A Riobamba, les poids de terre sont 36 fois plus importants que l'année précédente.

Ces données permettent d'illustrer que, dans le cas d'érosion par ruissellement, les seules hauteurs de pluies n'expliquent pas les pertes en terre. En calculant les coefficients de corrélation pour les années 1986-1987 et

ANNEE 1986 - 1987

ANNEE 1987 - 1988

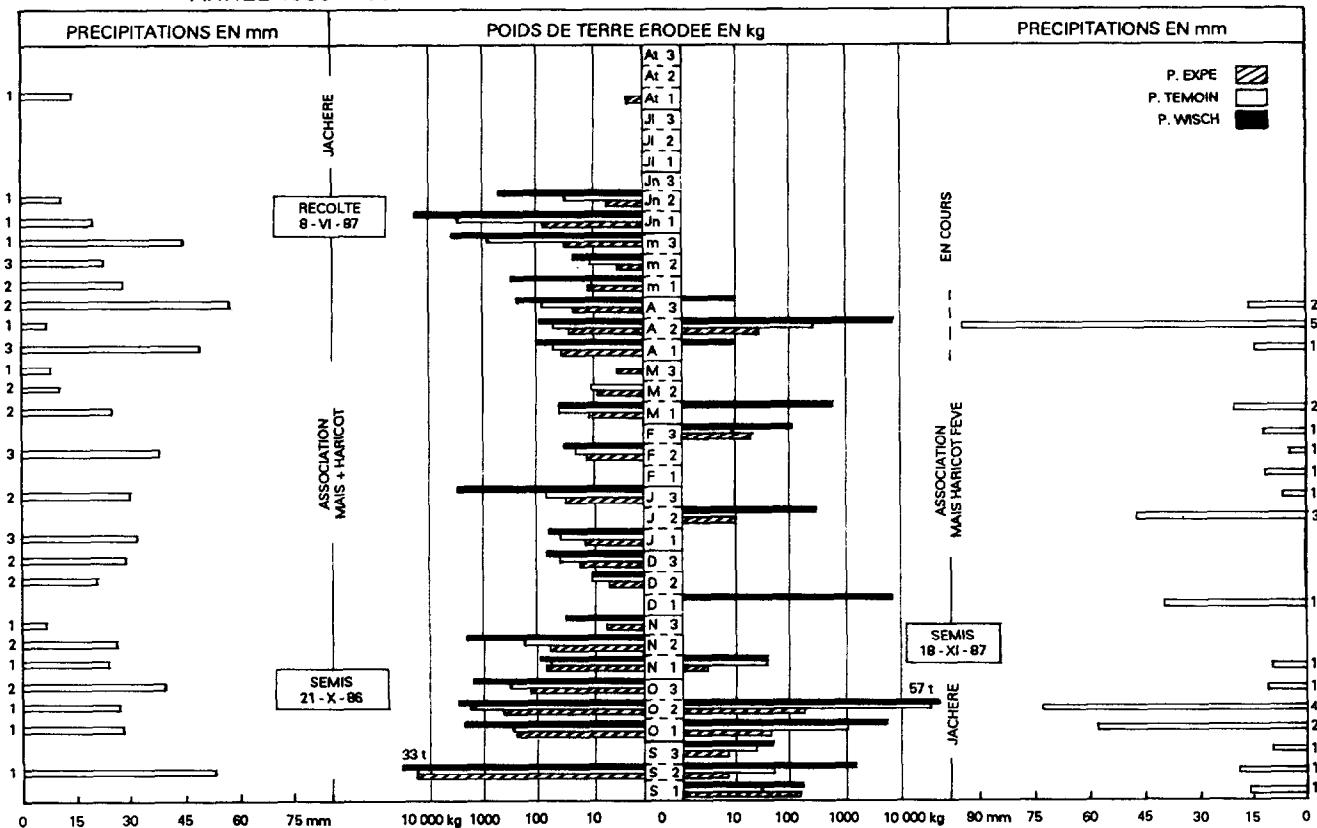


FIG. 2. — Station de Tumbaco.

Tumbaco station.

ANNEE 1986 - 1987

ANNEE 1987 - 1988

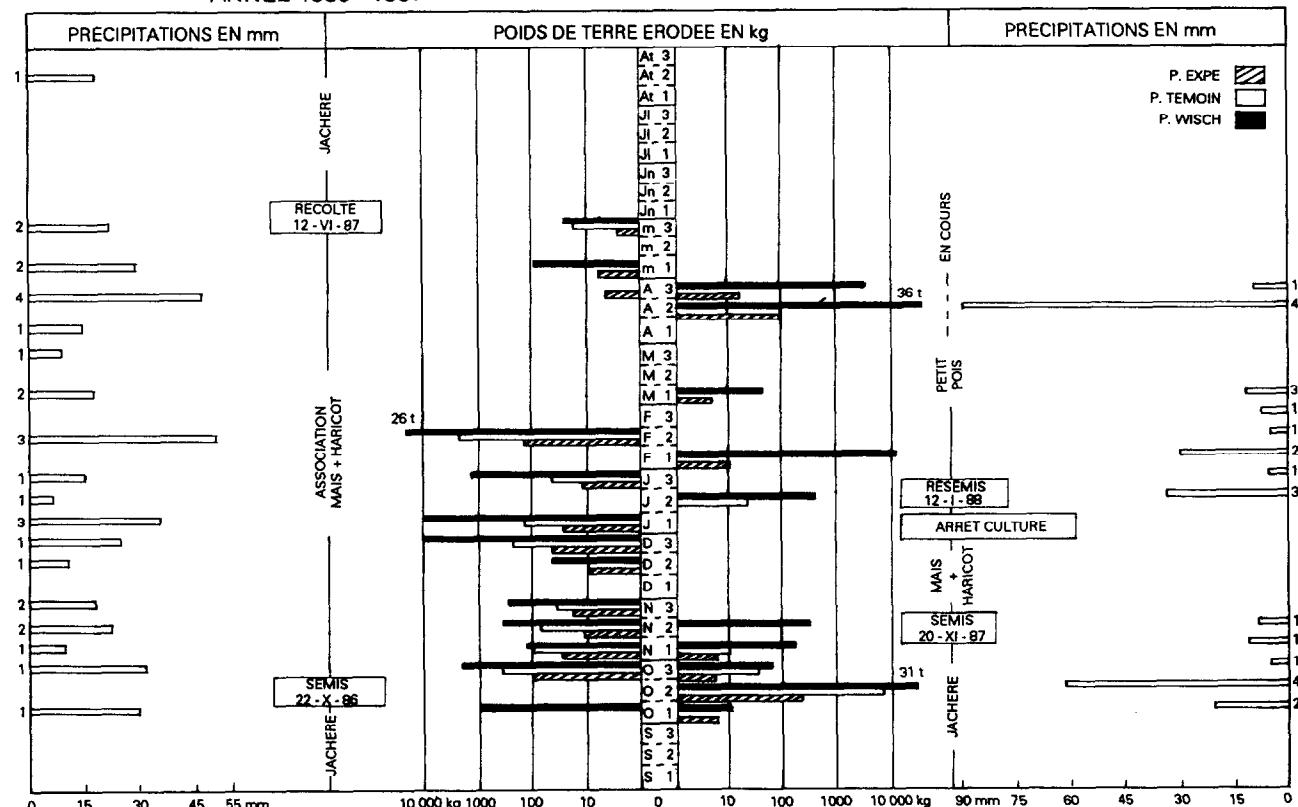
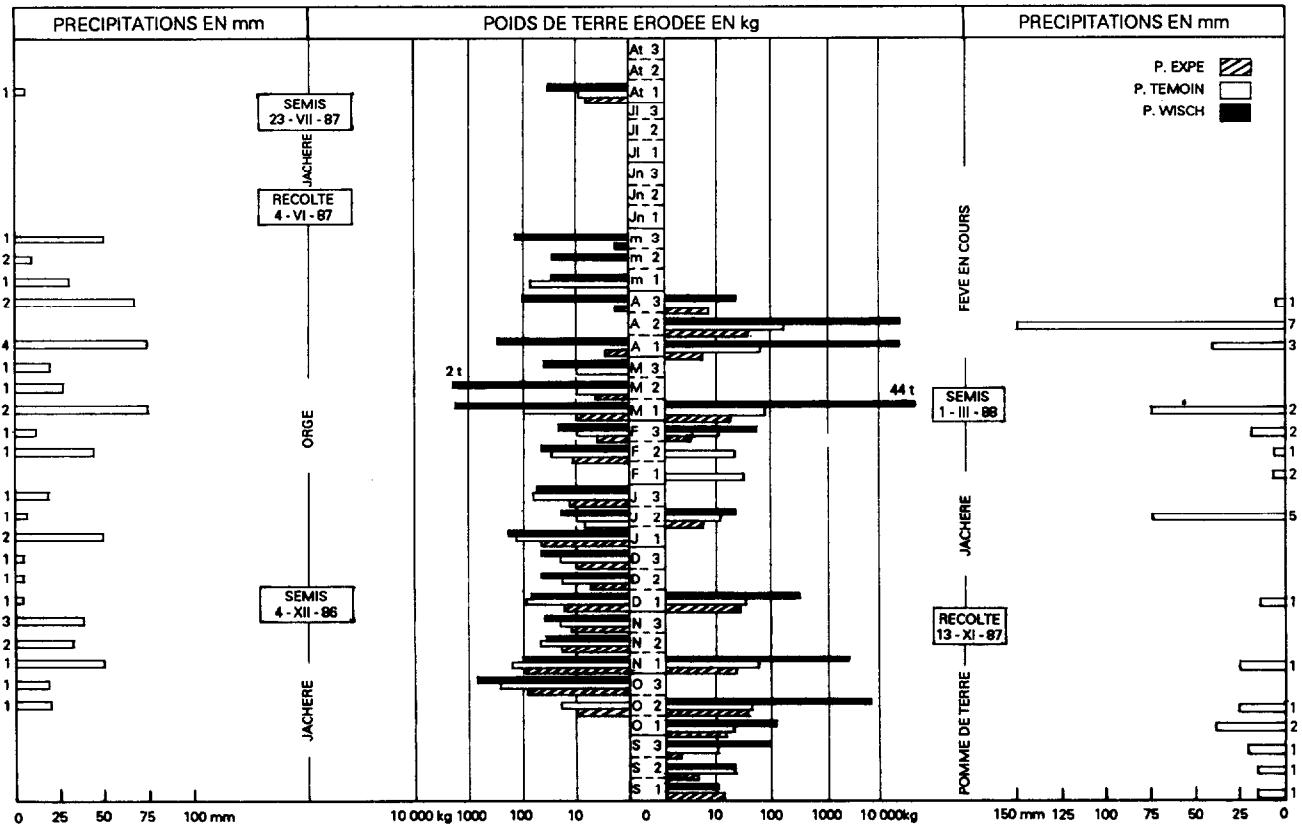


FIG. 3. — Station de Cangahua.

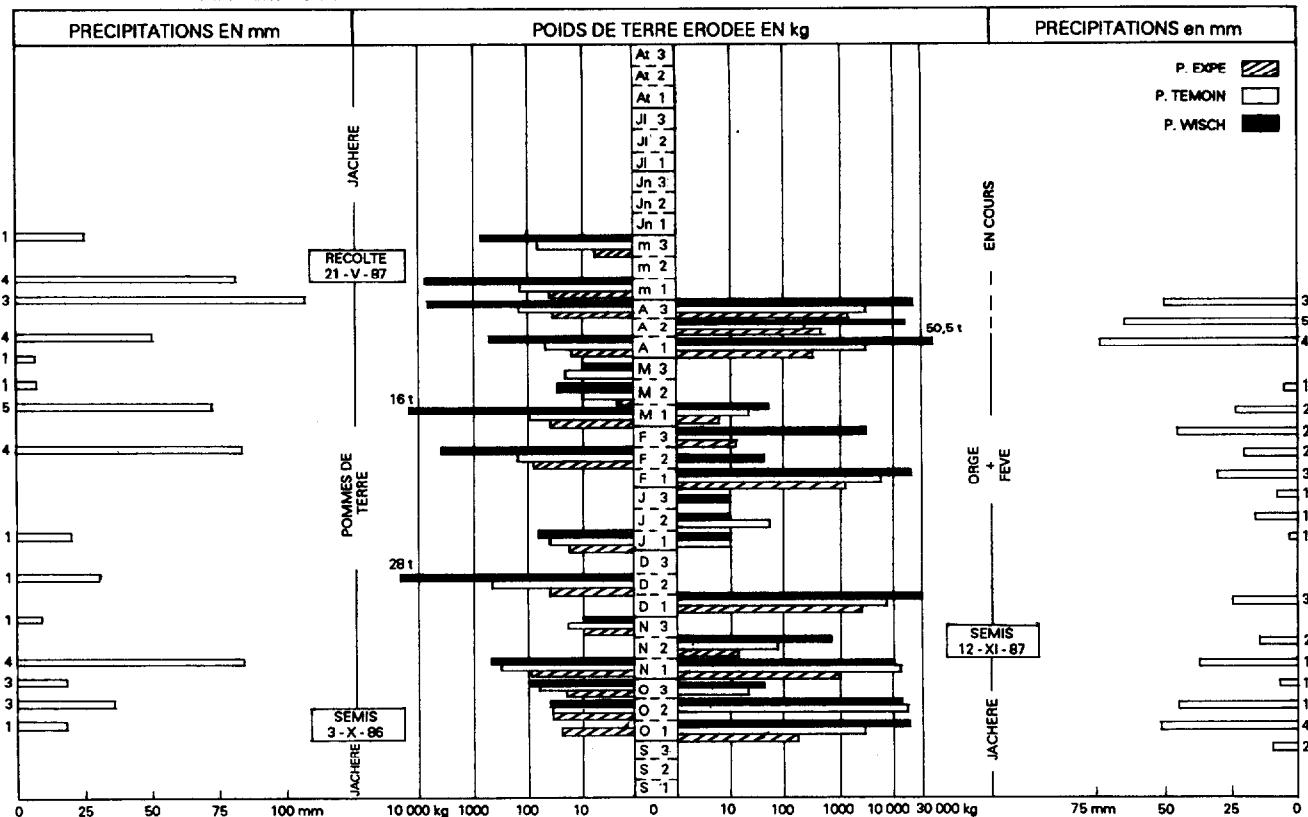
ANNEE 1986 - 1987

ANNEE 1987 - 1988

FIG. 4. — Station de Mojanda.
Mojanda station.

ANNEE 1986 - 1987

ANNEE 1987 - 1988

FIG. 5. — Station Riobamba.
Riobamba station.

1987-1988, nous notons que c'est avec l'IM15 ou l'IM30 que l'on observe les meilleures corrélations avec les poids de terre. Par exemple, pour les stations de Tumbaco et Cangahua, les coefficients de corrélation, sans ajustement préalable, sur les parcelles « Wischmeier » sont mis en évidence dans le tableau IV pour la période cumulée 1986-1988.

TABLEAU IV
Coefficients de corrélation pour les parcelles Wischmeier
(1986-1988)
Correlation modulus of Wischmeier plots

STATIONS	PLUIE/EROSION	INTENSITE MAXIMALE/EROSION		
		IM15	IM30	IM60
CANGAHUA	0.55	0.71	0.66	0.60
TUMBACO	0.55	0.92	0.86	0.67

On constatera aussi que pour ces 2 stations les liaisons les plus significatives concernent l'IM15 et les pertes en terre.

En règle générale depuis la mise en place des stations, les intensités maximales, qu'elles soient de 15 ou 30 minutes, présentent des valeurs faibles à moyennes : elles varient de 15 à 45 mm/h. Les valeurs de « R » (indice d'agressivité des pluies — FAO, 1980) sont également modérées : elles sont de l'ordre de 90 à Tumbaco, de 60 à Cangahua, de 110 à Mojanda et à Riobamba. En fait, le milieu morphoclimatique est équatorial par sa situation géographique mais fortement tempéré à cause de la haute montagne andine de telle sorte que les phénomènes climatiques sont irréguliers (orages de grêle fréquents) et difficiles à prévoir. Les valeurs de l'IM15 ou de l'IM30 sont également soumises à ces variations et, bien qu'elles ne dépassent que rarement 40 mm/h en moyenne, elles peuvent être exceptionnellement plus élevées et intensément érosives. Par exemple sur la parcelle de Ilalo, l'érosion passe les 400 t/ha/an en 1982 ; un IM15 de 90 mm/h ayant donné lieu à un prélèvement de 1 365 kg pour 50 m² et un autre de 70 mm/h étant responsable de 590 kg de terre perdue. Ce type de données n'a pas encore été observé sur les stations.

Cependant, bien que l'intensité maximale de la pluie en 15 ou 30 minutes constitue un paramètre d'interprétation fondamental, sur le terrain la dynamique des mécanismes semble plus complexe. En effet, on peut s'interroger pour déterminer si le comportement du sol vis-à-vis de l'érosion peut être conditionné également par son état d'humidité avant la pluie érosive. Si nous considérons conventionnellement qu'au terme d'une dizaine de jours une averse n'a plus d'influence sur les pertes en terre provoquées par la suivante (ROOSE, 1977), on constate sur les stations que l'état d'humidité du sol ne permet pas d'établir une relation étroite



PHOTO 1. — Une dense occupation agricole des sols sur forte pente. Province de Chimborazo.



PHOTO 2. — La station expérimentale et démonstrative de Mojanda.



PHOTO 3. — Muret en blocs de cendre volcanique indurée sur la station de Cangahua.

avec les variations de l'érosion. Par exemple à Riobamba, bien que la décennie antérieure au prélèvement du 6-V-87 ait été humide (185,6 mm) et que les IM 15 et 30 de la pluie érosive aient été respectivement de 42,8 mm/h et 34 mm/h, les pertes en terre ont été faibles. Au contraire, pour toutes les stations, on note en général que pour des totaux pluviométriques décadiques bas, fluctuant de 20 à 28 mm, on a procédé à des prélèvements de plusieurs tonnes : de 18 à 32 t. De la même façon, on note sur les tableaux en barres qu'il n'y a pas non plus de relation stricte entre la somme de plusieurs pluies dans le temps et l'accroissement de l'érosion, une seule averse à caractère exceptionnel pouvant être responsable de plusieurs tonnes de terre perdue.

3.2. Erodibilité des sols et ruissellement

— Les sols du couloir andin et des versants des cordillères reflètent bien la diversité des conditions du milieu et des matériaux qui leur ont donné naissance. Dans la partie nord des Andes équatorielles, depuis Alausí jusqu'à la Colombie, le paysage a été rajeuni par les glaciations successives et recouvert, à une époque récente, par une ou plusieurs couches de matériaux pyroclastiques (cendres, lapillis et pierres ponces) qui ont remodelé les formes du relief.

En dépit de leur jeunesse, les couches de projection, riches en produits vitreux, se sont altérées pour donner les trois principaux types de sols suivants :

- des sols argileux bien pourvus en montmorillonite (molisols de la USDA) que l'on observe plus particulièrement dans les parties basses, en présence d'une pluviosité relativement élevée et avec des matériaux moyens à fins ;
- des inceptisol à caractères andiques dans les zones hautes et froides à humidité permanente, ils sont liés à des matériaux moyens ou grossiers où se différencient des argiles hydratées de type allophaniques ;
- enfin dans les zones sèches, sur matériau originel grossier et quel que soit le climat, les sols sont peu évolués (Vitrandepts, Psammements), de texture sableuse avec la présence de nombreux morceaux de pierres ponces.

Dans le tableau V sont résumées les principales propriétés des sols des 4 stations installées en 1986 :

On remarquera la richesse en matière organique des sols de Mojanda ; la présence de celle-ci paraissant conditionner pour une large part le comportement des sols vis-à-vis de l'érosion. C'est ainsi que, malgré une pente de 40 % à Mojanda qui est le double de celle des trois autres stations, les pertes en terre sur les parcelles « Wischmeier » sont voisines à Mojanda, Cangahua, Tumbaco et 2 fois plus importantes à Riobamba. Les premiers tests de désagrégation à l'eau semblent corroborer cette remarque : par exemple à Riobamba et Mojanda, pour des sols riches en limon et sable fin et pauvres en sable grossier (texture battante), il y a

TABLEAU V
Principales propriétés des sols : horizon labouré des stations
Soils main properties : stations plowed horizon

Soil taxonomy USDA	andic Argiudoll	Durustoll	Durandept	udic Eutrandept
Argile %	7	14	21	7
Limon fin %	28	16	19	16
Limon gros.%	16	13	17	19
Sable fin %	28	38	31	35
Sable gros.%	13	29	6	16
Matière org. %	5.4	2.9	1.8	3.8
Azote total %	.22	.15	.06	.18
P2O5 total %	.11	.18	.15	.14
Ca ech. meq 100 g	5.9	12.8	7.9	5.9
Mg ech. meq 100 g	.9	3.6	4.4	3.4
K ech meq 100 g	.31	.54	.63	.31
pH eau	5.9	7.1	6.7	5.8
Da surface	.87	1.05	1.11	1.01
K cm/h Muntz	391	86	44	24

environ 2 fois moins d'agrégrats à Riobamba qu'à Mojanda.

Le résultat le plus intéressant concerne les mesures de perméabilité Muntz à double anneau réalisées sur sol au préalable débarrassé de sa végétation qui tendrait à le rapprocher des conditions « Wischmeier ». L'échelle des valeurs mesurées 24 à 391 cm/h est bien supérieure à la perméabilité réelle notée au champ mais respecte l'ordre des résultats de ruissellement et de pertes en terre observées sur les parcelles « Wischmeier ». La perméabilité Muntz en caractérisant celle de l'horizon limitant, ici la pellicule de surface, serait un bon test du comportement des sols vis-à-vis de l'érosion.

Ainsi que le montre le tableau VI, les coefficients annuels moyens de ruissellement en pourcentage des précipitations (KRAM) sont faibles bien que pour certaines averses les coefficients de ruissellement maximaux (KRmax) puissent atteindre des valeurs élevées en particulier sur les parcelles témoins et « Wischmeier ». Sur les parcelles expérimentales, les coefficients de ruissellement restent modérés si l'on excepte le cas de Riobamba où quelques pluies ont donné lieu à de forts ruissellements accompagnés d'une érosion encore « admissible ».

Dans le bassin interandin où le facteur eau est limitant, réduire le ruissellement présente un réel intérêt. Les résultats obtenus sur les parcelles expérimentales sont également satisfaisants dans ce sens. On note de façon évidente sur le terrain que la croissance des cultures est supérieure celles-ci.

TABLEAU VI

Coefficients de ruissellement en pourcentage de la pluie annuelle (KRAM)
 Coefficients de ruissellement maximum en pourcentage de la pluie (KRmax)
Runoff percentage of annual rainfall (KRAM)
Maximum Runoff percentage of rainfall (KRmax)

		Pluie annuelle en mm	P. Expérimentale		P. Témoin		P. Wischmeier	
			KRAM	KRmax	KRAM	KRmax	KRAM	KRmax
Mojanda	1986-1987	690	2.0	3	4.5	14	9.1	10
	1987-1988	549	1.2	1	4.2	10	11.1	15
Cangahua	1986-1987	414	.1	1	2.1	4	7.0	19
	1987-1988	308	.6	2	2.3	8	11.7	26
Tumbaco	1986-1987	649	.3	4	.8	36	1.9	45
	1987-1988	456	.2	4	1.3	19	8.1	20
Ribobamba	1986-1987	641	.4	1	1.5	38	26.1	46
	1987-1988	531	7.9	54	20.5	67	27.0	62

En supposant une indépendance des variables et que ces variables obéissent à des lois normales, nous avons calculé également les coefficients de corrélations entre les pertes en terre et le ruissellement pour les 4 stations et pour l'ensemble de la période. Nous notons qu'il existe également une bonne corrélation entre le ruissellement et les pertes en terre, ceci tant sur les parcelles « Wischmeier » que sur les parcelles témoins. Sur les parcelles expérimentales, où les ouvrages de conservation ont été conçus de façon à bloquer une partie du ruissellement et des sédiments, la corrélation est plus lâche. Ce résultat préliminaire est encourageant et il devrait être confirmé par les mesures en cours à la sonde à neutrons qui devraient nous permettre de suivre les variations de l'humidité dans le sol et en conséquence d'évaluer l'efficacité des ouvrages testés.

Nous avons enfin calculé à partir de l'eau ruisselée une valeur annuelle moyenne en g/l qui exprimerait de façon synthétique la détachabilité des sols et la capacité de transport du milieu. Les valeurs sont de 10 à 20 g/l pour les parcelles expérimentales, de 10 à 70 g/l pour les parcelles témoins et de 80 à 210 g/l pour les parcelles « Wischmeier » !

4. QUELQUES RÉFLEXIONS PRÉLIMINAIRES SUR LA CONSERVATION DES SOLS

La Sierra de l'Equateur ne constitue pas un bon exemple en matière de conservation des sols : il est courant d'observer que les labours à l'« asadon » (la houe

locale) s'effectuent, en général, dans le sens du versant et sur des pentes de 40 à 70 % densément occupées par les cultures, voire même localement jusqu'à plus de 100 % ; quant au tracteur, dont le rôle devient de plus en plus important, il est utilisé jusqu'à 60 % de pente. Lorsque le besoin de lutter contre l'érosion est trop manifeste, l'agriculteur trace superficiellement sur le sol des rigoles de dérivation des eaux (appelées localement « rayas ») qui ne permettent pas de régulariser les forts ruissellements parce qu'elles sont peu profondes, à peine 40 cm, et trop déclives, de 20 à 25 % de pente. L'absence flagrante de pratiques traditionnelles de conservation des sols a rendu difficile le choix de méthodes culturales à expérimenter sur les stations (DE NONI, VIENNOT, TRUJILLO, 1986). En outre, ce choix devait prendre en considération les caractéristiques particulières du milieu physique et humain de la Sierra ; considérant que les expériences résultant de projets menés conjointement avec le « farmer » américain ou l'agriculteur d'Afrique de l'Ouest sont difficilement transposables au genre de vie montagnard du paysan andin. Finalement, nous avons été conduits à opter pour les microbarrages perméables sous la forme de bandes enherbées ou cultivées et de murets, disposés selon les courbes de niveau. Ce système constitue un bon frein contre l'érosion parce qu'il laisse passer une partie de l'eau de ruissellement changée en particules fines et permet ainsi d'éviter les dangers d'une accumulation boueuse derrière les ouvrages ; en outre, il requiert peu de travail d'entretien de la part des paysans. Enfin,

il favorise l'infiltration de l'eau dans le sol ce qui n'est pas négligeable pour les zones du bassin interandin confrontées à des problèmes de déficit hydrique durant l'année culturelle. La distance entre les ouvrages a été fixée empiriquement à 12 m.

Pour déterminer le type de matériau à utiliser pour la construction de ces petits ouvrages, on s'est inspiré

de celui qu'emploient les paysans pour entourer leurs propriétés. On distingue les 3 principaux types de matériaux suivants : les murets en mottes de terre ou en blocs de cendre volcanique indurée (« cangahua ») et plus simplement les bandes enherbées avec du pâturage ou une culture (quinoa ou lupin). Les méthodes testées sont réparties par station comme indiquée au tableau VII.

TABLEAU VII
Les méthodes de conservation testées sur les parcelles expérimentales
Preservation methods tested on experimental plots

Stations	Pentes	Cultures		Méthodes de conservation sur les parcelles expérimentales.
		86-87	87-88	
TUMBACO	20 %	maïs	maïs	bandes enherbées avec 3 types de pâturage.
CANGAHUA	20 %	maïs	maïs	murets de "cangahua".
MOJANDA	40 %	orge/pommes de terre fèves		murets en mottes de terre et gros billon avec quinoa.
RIOBAMBA	20 %	pommes de terre/orge et fèves		bande enherbée avec associations de cultures (orge + fèves).

Il faut bien dire que cette manière d'envisager le problème va à l'inverse de ce que pense un grand nombre d'agriculteurs de la Sierra équatorienne qui considèrent le problème incontournable et strictement lié aux éléments naturels ou à la fatalité parce qu'il minimise l'influence des façons culturales.

Bien que l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols soient, sans nul doute, des facteurs déterminants de l'érosion dans les Andes de l'Equateur, les façons de travailler le sol conditionnent également les manifestations de l'érosion. En effet, comme le démontre la comparaison des résultats obtenus sur les parcelles témoins et Wischmeier (voir 2.2.), on constate que l'érosion régresse en fonction du travail du sol : le billonnage selon les courbes de niveau est le traitement le moins érosif. En outre, des systèmes de conservation simples, billonnage selon les courbes de niveau associé à des bandes enherbées ou à des murets de terre, font diminuer notablement l'érosion. Par exemple sur les stations de Tumbaco et Cangahua, en monoculture de maïs, les poids de terre perdue sur les parcelles expérimentales améliorées, de septembre 1986 à avril 1988, varient de 0.3 à 1.2 t/ha/an, entre 8 et 28 fois moins forts que sur la parcelle traditionnelle de maïs de Alangasi.

L'exemple des parcelles témoins situées à Riobamba et Tumbaco mérite également d'être souligné. Les poids

de terre perdus sur celles-ci sont faibles pour l'année 1986-1987 puis augmentent considérablement en 1987-1988 : respectivement 1.6 t/ha/an et 52.2 t/ha/an pour Riobamba ; 6.7 t/ha/an et 42.2 t/ha/an pour Tumbaco.

Pour Riobamba, on note sur le tableau en barres que pour la période allant de la 3^e décennie de septembre au 12 novembre 1987 (date de semis), 3 pluies érosives ont donné lieu à 33.8 t/ha de terre perdue. Pendant cette période qui se trouve à la charnière entre deux années culturelles, la parcelle témoin est nue et sans travail du sol et se comporte, en fait, comme une parcelle de type « Wischmeier ». Pour ces mêmes dates, l'érosion sur la parcelle expérimentale est de 1.1 t/ha.

Une remarque similaire peut être faite pour la station de Tumbaco : la seule pluie du 19 octobre 1987, en pleine jachère, le semis n'ayant lieu qu'un mois plus tard le 18 novembre, a provoqué une perte en terre de 33.9 t/ha. Pour la période considérée, la parcelle expérimentale ne perd que 140 kg.

On constate que la parcelle « Wischmeier » n'est pas seulement une parcelle de référence à caractère scientifique et fondamental, elle reflète également, dans notre cas, des états réels du calendrier agricole : jachère pauvre en végétation herbacée et parcelle nue au moment du semis de l'orge.

En définitive, c'est systématiquement sur les parcelles

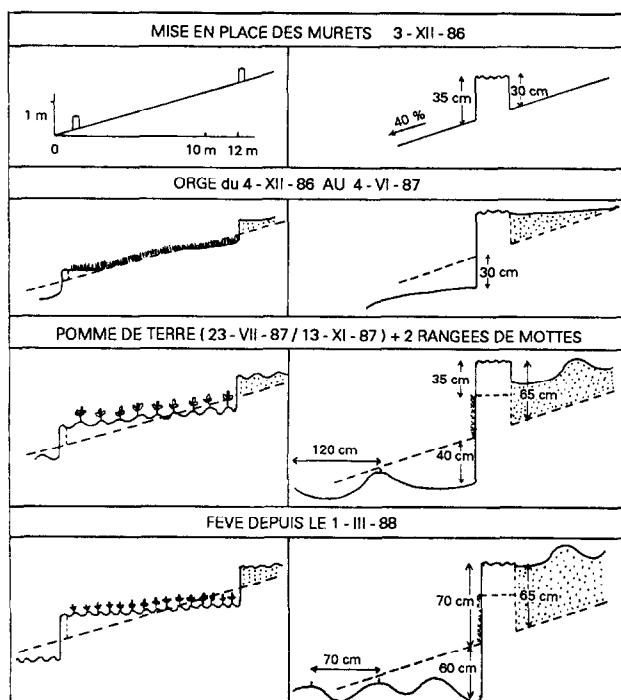


FIG. 6. — Station de Mojanda : évolution des murets en fonction de divers types de cultures et façons culturales.
Mojanda station : evolution of the low walls according to cultivation practices.

expérimentales, quelles que soient les stations, que les poids de terre sont minimaux (se reporter aux résultats globaux de la partie 2). Les rendements y sont également meilleurs : par exemple à Mojanda, la récolte de pommes de terre a été de 4.3 t/ha sur la parcelle témoin et de 7.6 t/ha sur la parcelle expérimentale.

Bien qu'encourageants, ces résultats préliminaires nous montrent que tous les problèmes ne sont pas maîtrisés et que, avant d'entreprendre des actions de sensibilisation et de vulgarisation, il est indispensable d'effectuer des observations préalables en conditions expérimentales. Cette remarque est fondée sur l'exemple fourni par les transformations morphométriques des ouvrages de conservation de la station de Mojanda (fig. 4). Au départ, les murets étaient constitués par deux rangées superposées de mottes de terre dont la hauteur était d'environ 30 cm. Puis, progressivement, l'agriculteur, bien plus que l'érosion qui est insignifiante sur cette parcelle (0,2 à 0,3 t/ha/an), a induit des déplacements considérables de terre, du haut vers le bas de la parcelle. Ceux-ci se produisent en général durant les travaux de semis et de récolte qui sont réalisés au moyen de la large lame de l'asadon qui permet à la fois de piocher profondément le sol et de tirer une grosse quantité de terre.

Les travaux de labour ou de piochage, qui commencent toujours au pied des murets, donnent lieu à un surcreusement à la base de ceux-ci, puis la terre est tirée vers le bas de la parcelle jusqu'à ce qu'un autre muret fasse obstacle. Ces déplacements simultanés de terre, par creusement à l'avant des murets et par remblaiement à l'arrière de ceux-ci, nous ont obligés à les surélever avec deux rangées supplémentaires de mottes, soit environ deux fois 35 cm. Sur 20 mois d'observation, la hauteur est passée de 30 cm à 1.30 m ; le profil rectiligne initial du versant évoluant progressivement vers un profil en terrasse. On estime que le poids de terre qui s'accumule par année derrière chaque muret est d'environ 8 t par 20 m linéaire, soit 40 t/ha dans le cas d'un seul ouvrage par 100 m. Il est remarquable de constater que cette évolution, que nous n'avions pas prévue, est à attribuer aux seuls travaux culturels.

CONCLUSION

Les résultats et leurs interprétations, exposés dans cet article, revêtent pour l'instant un caractère préliminaire. Si les résultats, relatifs aux relations entre pertes en terre et respectivement intensités pluviométriques et ruissellement, sont satisfaisants, ils devront être confirmés par les études en cours ; d'autres résultats, comme ceux obtenus à Mojanda sur les parcelles expérimentales ou sur la station de Riobamba, démontrent qu'il est nécessaire de procéder à des observations complémentaires.

Par exemple à Riobamba, les résultats sont beaucoup plus aléatoires que sur les trois autres sites : les pertes en terre ne sont dépendantes ni de la pluie, ni de son intensité, ni du ruissellement et ni même de la pente : en effet, comme nous l'avons précisé au paragraphe 3.2., pour des conditions culturelles et climatiques voisines, l'érosion est plus importante à Riobamba sur 20 % de pente qu'à Mojanda où la pente est de 40 %. Il semble ici que les caractéristiques physiques particulières des sols volcaniques constituent un facteur primordial d'interprétation. Les campagnes prochaines avec le simulateur de pluies devraient nous permettre d'approfondir cette question.

En ce qui concerne l'impact de nos résultats pour le développement agricole, les données obtenues sur les parcelles expérimentales sont, globalement, encourageantes et répondent aux aspirations de notre partenaire (DE NONI, VIENNOT, 1987). Grâce aux résultats acquis, ce dernier a pu mettre en place, depuis le début de l'année, des actions concrètes de développement auprès des agriculteurs et étendre son action au niveau national. Par exemple, l'expérience acquise depuis 2 ans a donné lieu à la mise en place d'accords tripartites entre notre partenaire, l'ORSTOM et d'autres organismes équatoriens

intéressés par ce type d'études, nous permettant ainsi d'avoir un rayonnement au niveau national et de sortir du cadre de la Sierra exclusivement volcanique. C'est ainsi que nous menons parallèlement les opérations suivantes (fig. 1) :

— avec le Centre andin de technologie rurale (CATER), 2 stations ont été installées, au cours du premier trimestre 1988, dans la province de Loja à l'extrême sud du pays ;

— pour la fin de cette année, 2 stations seront construites dans la région de Cuenca (Sierra centrale) en collaboration avec l'Institut équatorien d'électrification (INECEL) et une autre station à Ventanas sur la plaine côtière avec l'université technique de Babahoyo (UTB).

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 23-10-1989.

BIBLIOGRAPHIE

- ALMEIDA (G.), DE NONI (G.) *et al.*, 1984. — Los principales procesos erosivos en Ecuador. PRONAREG-PRONACOS-ORSTOM, Quito, 31 p. con un mapa del país a escala 1/1000 000.
- COLMET DAAGE (F.), AREVALO (A.), BERNARD (J.), PALLUD (A.), VELASQUEZ (H.), 1978. — Mapa de erosión actual y erosión potencial en la Sierra ecuatoriana, MAG-ORSTOM, Quito, 80 cartes à 1/50 000.
- DE NONI (G.), 1982. — Análisis cualitativo de tres procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador. CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación N° 2, Quito, 16 p.
- DE NONI (G.), NOUVELOT (J.F.), TRUJILLO (G.), 1984. — Erosión and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador : a case study. Sixth international soil classification workshop, Chile and Ecuador, part 1 : 263-274, SMSS (Washington), PUCC (Santiago de Chile).
- DE NONI (G.), NOUVELOT (J.F.), TRUJILLO (G.), 1986. — Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos : las parcelas de Alangasi y Ilalo. CEDIG-ORSTOM, Documentos de investigación N° 6, Quito, 35-47.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), 1985. — Estudio de algunos procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador (3 200 m-4 800 m). *Revista colombiana de la ciencia del suelo*, Vol. XVI, n° 1, Bogota : 23-31.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), TRUJILLO (G.), 1986. — L'érosion et la conservation des sols en Equateur, *cah. ORSTOM, sér. Ped.*, vol. XXII, N° 2, Paris : 235-245.
- DE NONI (G.), VIENNOT (M.), 1987. — De l'approximation cartographique aux réalisations de terrain : la lutte contre l'érosion agricole dans les Andes équatoriennes. Colloque sur les sociétés rurales de montagne (Andes et Himalaya), Grenoble.
- DE NONI (G.), POURRUT (P.), VIENNOT (M.), 1987. — Analyse de l'impact du « Nino » 1982-83 sur le milieu morphodynamique instable de l'Equateur. Colloque « Climats et risques naturels », AFGP, Paris : 157-168.
- FAO, 1980. — Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols. Rome, 88 p.
- FOURNIER (F.), 1960. — Les relations entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques, In : Climat et érosion. PUR, Paris, 201 p.
- GONDARD (P.) et Département de géographie de PRONAREG, 1981-83. — 10 cartes en couleurs, 1/200 000, d'utilisation actuelle des sols et des formations végétales dans la Sierra de l'Equateur. MAG — ORSTOM, Quito.
- ROOSE (E.), 1977. — Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales, ORSTOM, Paris, 108 p.
- ROOSE (E.), 1980. — Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique occidentale : stratégies anciennes et nouvelles. Communication au séminaire « Gestion des eaux, des sols et des plantes », Niamey, 17 p.
- USDA, 1975. — Soil taxonomy. Agriculture handbook N° 436, Washington D.C., 754 p.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.), 1978. — Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Agriculture Handbook N° 537, Washington D.C., 58 p.