

latitudes 23

Terres d'altitude, terres de risque

La lutte contre l'érosion
dans les Andes équatoriennes

Georges De Noni, Marc Viennot,
Jean Asseline, German Trujillo

IRD
Éditions

Terres d'altitude,
terres de risque

La lutte contre l'érosion
dans les Andes équatoriennes



Terres d'altitude, terres de risque

La lutte contre l'érosion
dans les Andes équatoriennes

Georges De Noni, Marc Viennot, Jean Asseline, German Trujillo

Éditions de l'IRD
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Collection Latitudes 23

Paris, 2001

« Latitudes 23 » est une collection généraliste, pluridisciplinaire. Elle vise à publier des synthèses thématiques ou géographiques privilégiant les systèmes complexes, croisant différents regards, et à faire le point sur une question à une large échelle de temps et d'espace. Les thématiques privilégiées sont : relations hommes-milieu, gestion des ressources naturelles, environnement-développement. Toutes les disciplines sont concernées, avec une priorité accordée aux approches associant les sciences de la nature et de la société.

Directrice de collection : Marie-Christine Cormier-Salem (cormier@mnhn.fr)

Couverture

Anciennement cultivé, ce versant situé dans la Sierra volcanique est aujourd'hui raviné et abandonné. Le sol érodé a été remplacé par la cangahua indurée, impropre à l'agriculture.

Frontispice

L'érosion régressive pousse les petits paysans à migrer en altitude pour mettre en culture de nouvelles terres. L'orge, en cours de récolte, s'est substituée à la végétation herbacée du paramo. Les neiges éternelles du Chimborazo, le plus haut volcan du pays (6 310 m) semblent désormais toutes proches.

Préparation éditoriale, coordination : Corinne Lavagne

Mise en page : Gris Souris

Correction : Yolande Cavallazzi

Maquette de couverture : Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure : Catherine Plasse

Crédit photographique : © IRD/De Noni, sauf p. 36 (© IRD/Portais)
et pp. 106, 132, 191 (© IRD/Asseline).

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© IRD éditions, 2001

ISSN : 1278-348X

ISBN : 2-7099-1469-7

Remerciements

Ce livre est l'aboutissement d'un travail de recherche qui s'est déroulé durant plusieurs années dans les Andes d'Équateur. Une recherche de conception pionnière, tant par sa localisation géographique dans une région du monde tropical nouvelle pour l'institut que par son contexte en coopération. Pour répondre à ce point essentiel, une large place a été accordée à la valorisation pratique et appliquée des résultats scientifiques et au partage des « savoir-faire » au profit des partenaires et de la population paysanne par une démarche permanente formative et participative. Nous dirions aujourd'hui que nous étions « avant la lettre » dans l'esprit des unités de service que vient de créer l'institut.

Ce livre a donc bénéficié des compétences de nombreuses personnes qu'il nous est agréable de pouvoir rappeler et remercier ici. Le premier regard va d'abord vers nos collègues et amis équatoriens, à Quito : Edmundo Custode, Carlos Lopez, Ana Lopez, Carlos Luzuriaga, Ediltrudis Mendoza et les directeurs Nelson Penafiel, Enrique Suarez, Oswaldo Guevara, Marcelo Sarmiento, Raul Escobar, Eduardo Mayacela ; à Riobamba : René Ponton et Cesar Benitez ; à Cuenca : Florencio Calle ; à Loja : Rafael Morales et à Babahoyo : Bolivar Bravo.

Pour l'institut, nombreux sont aussi les collègues et amis qui ont favorisé la réalisation de cette recherche. Trois responsables de mission (Michel Portais, Pierre Pourrut et René Marocco) se sont succédé durant la période de notre étude, ils ont soutenu et facilité avec une égale détermination l'accomplissement de nos objectifs. Alain Plenecassagne a tenu un rôle actif de relais entre le terrain et le laboratoire ainsi que Jean-François Nouvelot pour les liaisons utiles et nécessaires avec l'hydrologie, et Pierre Peltre a contribué à la publication des premières synthèses. L'énumération serait longue encore, aussi, que tous ceux qui ont aidé sous une forme ou une autre trouvent ici l'expression de la profonde reconnaissance de l'équipe. En évoquant les membres de la mission Orstom de Quito de cette époque, ce n'est pas sans une émotion immense que nous pensons à nos amis Claude Zebrowski et Henri Barral, disparus trop rapidement.

Pour terminer, nos remerciements très reconnaissants vont aux commissions scientifiques de Géographie et de Pédologie de l'époque, qui ont assuré les relectures du document initial ; aux responsables scientifiques

et chercheurs de la base arrière de Montpellier, où s'est effectuée la rédaction : Roland Moreau, Jean-François Vizier, Eric Roose, Christian Feller et Jean-Claude Leprun ; à Anne-Lise Viala, pour de multiples tâches de secrétariat toujours réalisées avec promptitude et gentillesse et aux professeurs d'université Yvette Veyret, Jean-Jacques Barathon, Anne Collin Delavaud et Michel Mietton. Ces mêmes remerciements s'adressent au service des Éditions de l'institut, ainsi qu'à la responsable de la collection « Latitudes 23 », Marie-Christine Cormier Salem, et pour le travail d'édition, réalisé avec savoir-faire, disponibilité et gentillesse, à Corinne Lavagne pour le texte et à Pierre Lopez pour les illustrations.

Georges De Noni

Les auteurs

Les auteurs ont consacré une partie importante de leur carrière à l'étude de l'érosion des sols et de la lutte antiérosive en milieu tropical. Ils représentent des disciplines scientifiques très complémentaires :

Georges **De Noni**, géographe physicien, IRD, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, denoni@mpl.ird.fr.

Marc **Viennot**, pédologue, IRD, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, viennot@mpl.ird.fr.

Jean **Asseline**, pédologue (hydrodynamique), IRD, 911 av. Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, asseline@mpl.ird.fr.

German **Trujillo**, agronome, ministerio de Agricultura y Ganaderia, Avenida Amazonas e Eloy Alfaro, Quito, Ecuador.

Sommaire

Préface	9
Introduction	11
L'ÉROSION DES SOLS :	
FACTEURS ANTHROPIQUES ET PROCESSUS	
Un agrosystème d'altitude à forts risques érosifs	21
Le constat d'échec de la lutte antiérosive dans la Sierra	39
L'érosion accélérée des sols dans la Sierra	49
MESURER L'ÉROSION	
Les parcelles expérimentales et la simulation de pluies	75
Caractéristiques des stations	87
Les résultats des parcelles de ruissellement témoins	111
Les résultats des simulations de pluies	131
LA LUTTE ANTIÉROSIVE DANS LES ANDES ÉQUATORIENNES.	
DE L'EXPÉRIMENTATION À L'APPLICATION	
La lutte antiérosive : mythe ou réalité ?	153
Les résultats : l'expérimentation au service de la lutte antiérosive	161
Conclusion	189
Références	197
Résumé	205
<i>Summary</i>	207
<i>Resumen</i>	209
Table des illustrations	211
Table des matières	217

Préface

Bien que lointain, l'Équateur est une contrée andine qui a suscité de tout temps la curiosité des scientifiques et des naturalistes européens, attirés par la richesse et la diversité de ses paysages montagneux. Le souvenir de la fameuse expédition française menée au XVIII^e siècle par La Condamine et Bouguer pour déterminer la longueur d'un arc de méridien reste vivace.

En 1975, je séjournai dans ce pays. Dans ma mémoire, je revois le milieu géographique et pédologique de Quito et de la Sierra, dominé par de hauts volcans aux neiges pérennes et formé de versants aux terrains pyroclastiques occupés par un damier de petites parcelles de cultures. Associés à ce milieu, je revois aussi des versants ravinés, parfois désertés à cause de la mise à nu de la « cangahua », cette induration blanchâtre qui stérilise les sols. Cette petite agriculture, le minifundio, peu défendue contre l'érosion accélérée, nécessitait donc une étude spécifique afin d'en réduire les conséquences néfastes pour la fertilité des sols et la qualité de vie des paysans. C'est donc dans cette région andine, en coopération avec le ministère équatorien de l'Agriculture, que l'IRD, ex-Orstom, s'est intéressé pour la première fois à l'érosion des sols agricoles en montagne tropicale et a élaboré des méthodes conservatoires à la portée du paysannat.

L'ouvrage est conçu en fonction des trois phases qui ont guidé le travail des chercheurs. Tout d'abord, il a fallu localiser et estimer les principales dynamiques de l'érosion – que ce soit le ruissellement concentré associé au ruissellement diffus ou ponctuellement relayé par les mouvements de masse et l'érosion éolienne – en fonction des pentes, de la nature du substrat, de la pluviométrie, de l'utilisation des terres (dans le passé et le présent). Ensuite, des sites expérimentaux variés ont été choisis sur lesquels l'érosion a été mesurée à l'échelle de la parcelle de ruissellement et où la simulation de pluies a également été mise en œuvre. Ainsi, ont été reproduites des intensités de pluie, en millimètres à l'heure (parfois même à la minute), intensités momentanées ou durables, pour observer l'impact des gouttes et l'agressivité de la pluie, ainsi que l'exportation des matières solides, et pour comparer aux résultats provenant des parcelles de ruissellement témoins, cultivées ou non, sous pluie naturelle. Cette démarche, à la fois analytique et synthétique, unit le concret et le schéma logique.

Mais il n'y a pas que des parcelles témoins et des placettes pour la simulation de pluies. L'important étant de développer une stratégie participative du paysannat qui intègre les méthodes conservatoires traditionnelles, souvent trop incomplètes, et les propositions scientifiques, on a imaginé, en culture paysanne, des « parcelles améliorées » un peu plus grandes que les parcelles de ruissellement témoins et mettant en œuvre des améliorations telles que la réalisation de bandes enherbées, de murets de mottes ou de pierres, de fossés d'infiltration. On a expérimenté le broyage de la cangahua et son enrichissement par incorporation de matières organiques. Les résultats sont originaux et globalement positifs ; ils montrent bien que les apports de la recherche sont adaptables aux coutumes locales et aux possibilités socio-économiques du paysannat. Cette étude s'intègre dans une réalité de laquelle l'homme n'est jamais absent.

Cet ouvrage édité dans la collection « Latitudes 23 » est le résultat de ce travail. Il cherche à être accessible aux lecteurs cultivés, pas nécessairement spécialisés en pédologie ou en géographie, mais guidés par un ensemble de repères pratiques et utiles sur la géographie des Andes, l'érosion des paysages et des sols, la lutte antiérosive et l'impact d'une recherche pour le développement. Il est le fruit d'une équipe pluridisciplinaire et binationale, composée de Georges DE NONI, géographe physicien, responsable de l'équipe, très tôt passionné par une recherche utile pour la société et qui fut mon étudiant, de Marc VIENNOT, pédologue proche de la géographie et de la cartographie des sols, de Jean ASSELINE, concepteur du simulateur de pluies et de German TRUJILLO, agro-pédologue équatorien.

Max DERRUAU
Professeur honoraire,
Université Blaise-Pascal – Clermont-Ferrand

Introduction

Les sols forment l'épiderme de notre planète et constituent le support des activités humaines, notamment de l'agriculture. Directement exposés aux actions d'agents naturels tels que l'eau et le vent, ainsi qu'à l'impact de l'action anthropique, ils sont sensibles à l'érosion. Lorsqu'ils sont cultivés et qu'ils ne sont donc plus protégés par la végétation naturelle, cette sensibilité augmente. Elle devient très élevée lorsque le paysan cultive ses terres de manière intensive, sans se soucier des risques d'aggravation de l'érosion.

Dans tous les cas, l'érosion arrache et transporte des particules de sol en commençant en surface par la couche arable où se concentrent les éléments les plus fins et les plus fertiles. Un sol peut ainsi disparaître en quelques années, alors que sa formation, qui suit le rythme de l'évolution géologique de la planète, a nécessité plusieurs milliers d'années (DERRUAU, 1988 ; DUCHAUFOUR, 1995). Si l'homme est plus imprudent encore, les effets de l'érosion peuvent s'avérer catastrophiques en augmentant les risques d'inondations et de glissements de terrains qui mettent en péril les infrastructures et les vies humaines (NEBOIT, 1991 ; VEYRET et PECH, 1993).

Au même titre que les phénomènes qui affectent la qualité de l'air et de l'eau, l'érosion est un problème bien réel qui influe sur la qualité des sols et de notre environnement et qui peut nuire gravement à notre santé et à notre qualité de vie. La mise en œuvre de moyens de lutte est donc une nécessité vitale pour maintenir la fertilité des sols, notamment dans les pays du Sud, où les besoins alimentaires des populations en forte croissance démographique font peser sur les sols une pression plus forte encore. Néanmoins, entre les bonnes résolutions et les réalités de terrain, il y a un décalage, car les réalisations pratiques ne répondent pas toujours aux attentes des populations. En effet, malgré la somme de connaissances réunies au cours des cinquante dernières années, tant sur les manifestations de l'érosion que sur les moyens de contrer leurs effets, le nombre d'échecs dans le domaine de la lutte antiérosive reste élevé.

Le travail de recherche présenté dans cet ouvrage se place dans cette problématique. En liant recherche cognitive et application, deux pôles essentiels complémentaires et associés qui, loin de s'opposer, forment un cadre d'intervention nécessaire, notre travail s'est fondé sur une démarche participative réellement vécue avec le paysannat. Il a ainsi



CARTE 2 —
Situation de l'Équateur
sur le continent sud-américain

270 000 km²
3 régions naturelles

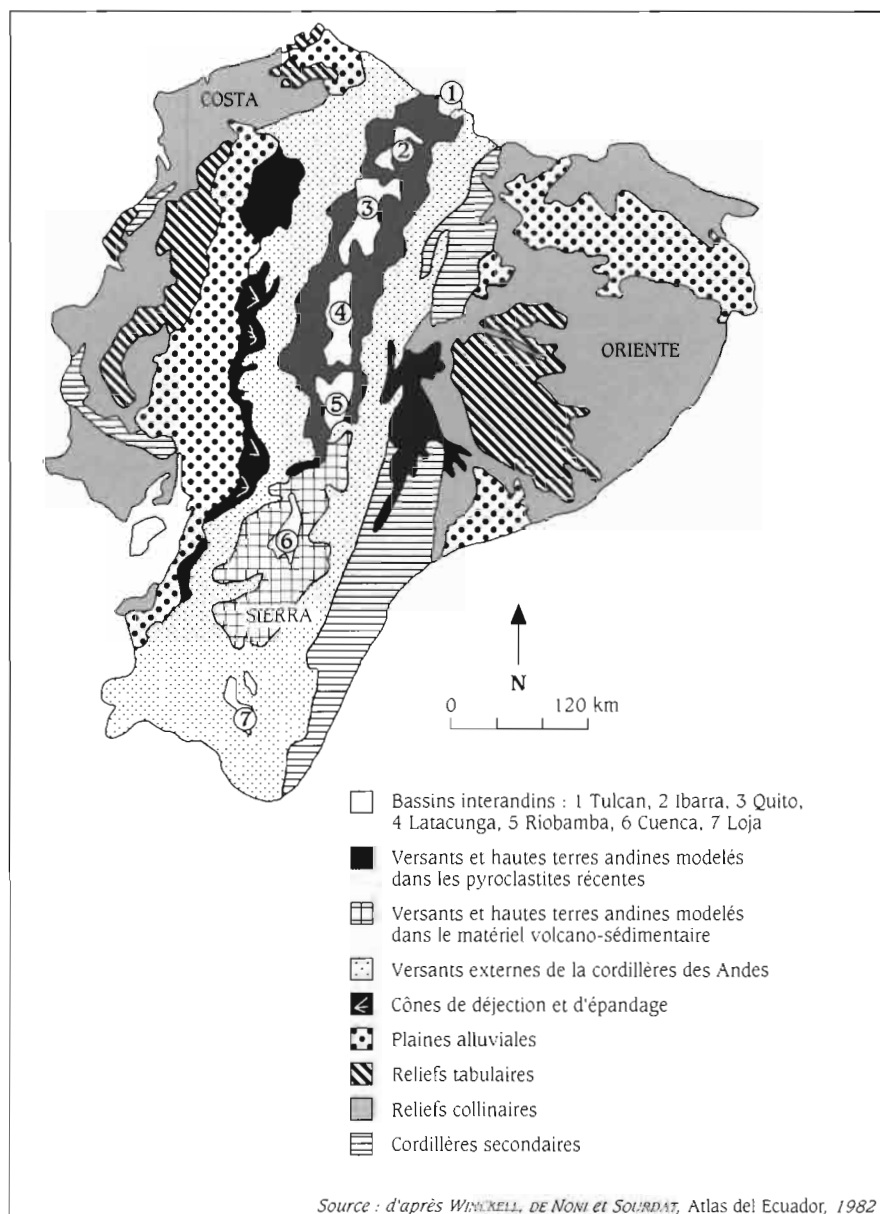
- ❶ La Costa
- ❷ La Sierra
- ❸ L'Amazonie

permis d'identifier des méthodes de lutte antiérosives efficaces et adaptées au contexte local. Il s'est déroulé en Amérique du Sud dans un pays andin, l'Équateur, où la haute montagne très peuplée présente d'importants problèmes d'érosion des sols et de lutte antiérosive.

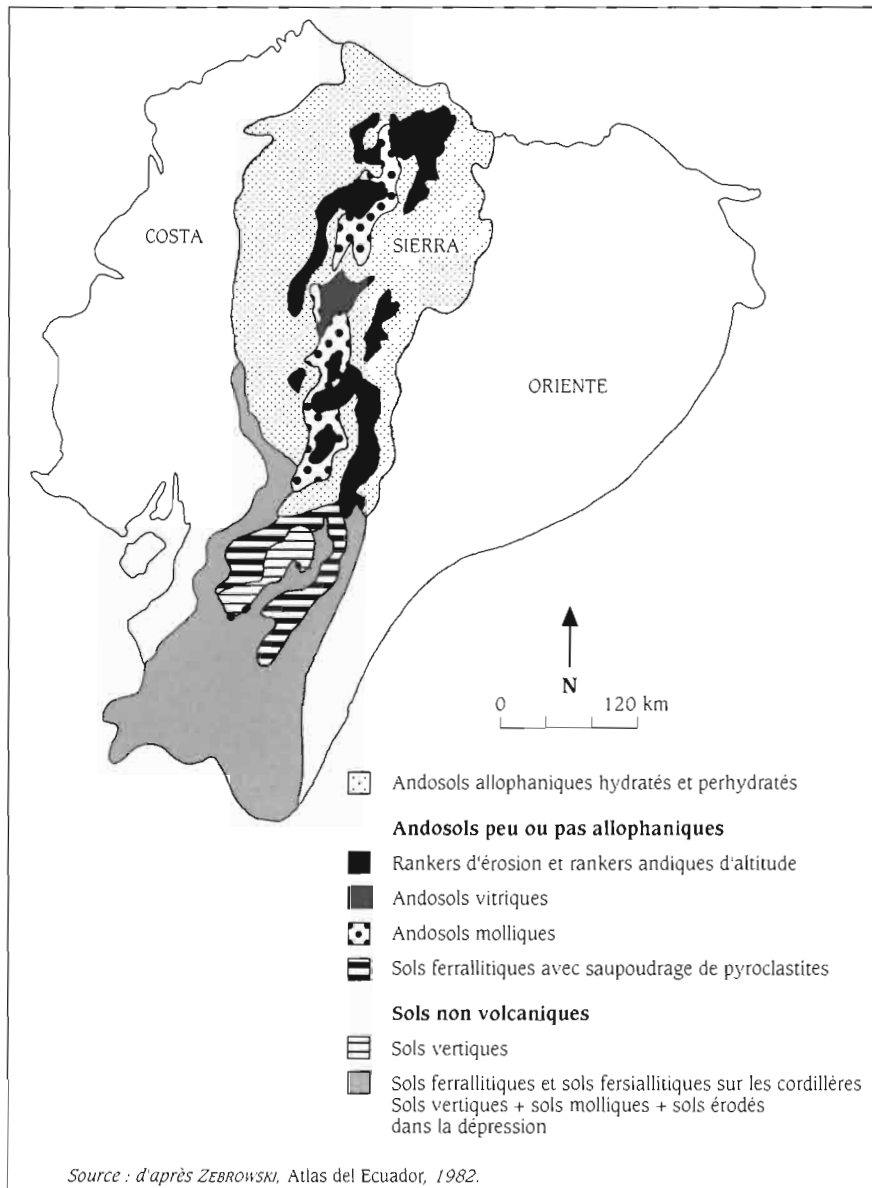
Situé à cheval sur la ligne équatoriale, entre 1° 25' de latitude nord et 5° de latitude sud, ce pays est limité au nord par la Colombie, au sud et à l'est par le Pérou. D'une superficie de 270 000 km² et peuplé par 11 millions d'habitants, il est traversé sans discontinuité par la cordillère des Andes, appelée localement « Sierra ». À l'ouest de celle-ci se trouve la côte pacifique ou Costa, et à l'est l'Amazonie ou Oriente, où les problèmes d'érosion sont mineurs en comparaison avec la Sierra andine (cartes 1 [hors texte] et 2).

La Sierra, large de 100 à 120 km, est divisée en deux cordillères parallèles séparées par une dépression. Cette dernière est subdivisée en une série de petits bassins, pour la plupart d'origine tectonique, qui s'étagent du nord au sud entre 1 500 et 3 000 m (SAUER, 1965 ; COLMET-DAAGE *et al.*, 1979-1980 ; DERRUAU et DE NONI, 1979 ; COLMET-DAAGE *et al.*, 1983-1985). Dans la partie nord et centre de la Sierra, depuis la frontière colombienne jusqu'à la zone d'Alausi, soit sur les deux tiers environ de la

CARTE 3 —
Principaux ensembles
topographiques
de l'Équateur



région, les cordillères portent de hauts strato-volcans (4 500-6 000 m) qui ont émis de puissants dépôts pyroclastiques (carte 3). Les sols dérivés de ce matériau sont des andosols (carte 4). Parmi eux, un sol particulier composé d'horizons indurés, la cangahua, recouvre une large superficie dans la Sierra. Elle est associée aux sols vitriques et molliques.



Dans la partie sud de la Sierra, depuis la zone d'Alausi jusqu'à la frontière péruvienne, les pyroclastites disparaissent ; le modelé est taillé dans les roches du socle sur les cordillères et dans des dépôts détritiques sédimentaires dans les bassins de la dépression. Les sols dominants sont des sols ferrallitiques et fersiallitiques sur les cordillères, et des sols molliques et vertiques dans la dépression (cartes 3 et 4).

Quel que soit le substrat, on distingue dans la Sierra trois grands types de paysages. Les versants d'abord, qui forment de longs plans topographiques rectilignes, étagés entre 1 500 et 3 200 mètres. Les pentes sont en général comprises entre 40 % et 70 % et sont incisées par des ravins aux formes parfois vertigineuses appelés *quebradas* ou *cañons*. Le climat est tempéré, assez frais, avec des précipitations annuelles comprises entre 800 et 1 200 mm.

Ensuite, au pied des versants, dans une gamme d'altitudes comprises entre 1 500 et 2 500 mètres, se succèdent tout au long de la Sierra, entre les deux cordillères, des bassins et des vallées plus ou moins larges. Au contact entre ces derniers et les versants se sont formés en fonction des gradients climatiques des glacis-terrasses et des cônes de déjection. La position d'abri entre les cordillères confère à ces zones déprimées un climat propice à l'agriculture, avec des précipitations annuelles comprises entre 600 et 400 mm.



L'Équateur se caractérise par une mosaïque exceptionnelle de paysages due à la présence de la cordillère des Andes, appelée « Sierra ».

On y observe, sur de courtes distances, la juxtaposition d'écosystèmes froids, tempérés et chauds. Les plus hauts sommets, les *nevados* (ici le Chimborazo, 6 310 m), sont des volcans portant une calotte pérenne de neige et de glace.

Enfin, en haut des versants, à partir de 3 200-3 400 mètres, s'étendent les hautes terres. Les formes sont plus arrondies et massives, c'est un milieu difficile où les conditions climatiques deviennent extrêmes. Dans cet étage, des zones caractérisées par le froid, le gel fréquent et la neige alternent avec d'autres zones très humides (brouillards), où les précipitations annuelles dépassent 2 000-3 000 mm.

L'occupation des terres de la Sierra est très ancienne. Elles ont connu une histoire particulière marquée par l'impact de la conquête espagnole qui a favorisé la formation d'un petit parcellaire de faible productivité, le « minifundio », sous le contrôle des grands domaines, les haciendas ou « latifundios ». Depuis une quarantaine d'années, le minifundio s'est étendu massivement sur les versants et hautes terres andines en provoquant une accélération des risques d'érosion des sols.

Ainsi le minifundio représente un type d'agrosystème d'altitude hors norme par rapport aux principes de l'agronomie conventionnelle et qui ne serait pas concevable sous nos latitudes. Mais sous les tropiques, les contraintes liées à l'altitude étant repoussées vers l'amont, le paysan peut cultiver et subsister à des altitudes très élevées. À l'échelle de la planète, cette situation est loin d'être exceptionnelle car les montagnes tropicales occupent une superficie d'une dizaine de millions de km² pour une population de l'ordre d'un demi-milliard de personnes. Rien qu'en Amérique du Sud, la cordillère des Andes, qui traverse la zone tropicale sur 5 000 km environ, du Venezuela au nord du Chili, renferme près de 40 millions de personnes qui vivent entre 1 500 et 4 000 mètres, avec trois capitales (Bogota en Colombie, Quito en Équateur et La Paz en Bolivie) qui dépassent le million d'habitants et la côte d'altitude des 2 500 mètres ! La réactivation de l'érosion des sols constitue l'une des contraintes majeures communes à ces milieux.

Ces quelques données d'ordre général font ressortir la nécessité de mieux connaître la montagne tropicale et les agrosystèmes qui s'y sont développés, tel le minifundio dans les Andes, afin de favoriser la mise en œuvre d'un développement durable vital pour les générations actuelles et futures, fondé sur des principes réalistes de lutte antiérosive.

Pour atteindre cet objectif, l'IRD a travaillé en partenariat avec le ministère équatorien de l'Agriculture et de l'Élevage (MAG), notamment avec les ingénieurs agronomes et techniciens de la Direction nationale agricole (DNA). Une équipe binationale a été constituée pour mettre en œuvre une démarche liant recherche cognitive et application, qui s'est calquée sur le précepte de F. Fournier, l'un des précurseurs francophones dans le domaine de l'étude de l'érosion et de la lutte antiérosive : « Guérir une

maladie nécessite avant tout de la connaître. La reconnaissance et l'étude de l'érosion sont les préalables de toute politique de conservation ».

Le plan de cet ouvrage suit cette démarche. La première partie pose les principaux éléments de diagnostic de la situation érosive dans la Sierra, qui est conditionnée par un environnement physique et humain représentatif d'une haute montagne tropicale. La deuxième partie précise les méthodes d'étude suivies pour mesurer l'érosion. Les résultats obtenus à plusieurs échelles et la recherche des facteurs explicatifs sont précisés et discutés. Enfin, la troisième partie est consacrée exclusivement à la lutte antiérosive et aux aspects pratiques de sa mise en œuvre au moyen d'une démarche participative.



Le volcanisme occupe une place très importante dans la géologie des Andes. Dans la partie nord de la Sierra, la densité de volcans est telle qu'on l'appelle « l'avenue des volcans ».

Parmi ceux-ci, le volcan Pichincha (4 794 m), au pied duquel s'étend la ville de Quito, capitale du pays, présente une activité fumerollienne quasi permanente. En 1999, ce volcan a émis pendant plusieurs jours des cendres fines qui ont provoqué une grande panique dans la ville.



L'érosion des sols :
facteurs
anthropiques
et processus

Un agrosystème d'altitude à forts risques érosifs

Le minifundio, type d'agrosystème d'altitude typiquement andin, est une des composantes essentielles des paysages anthropisés de la Sierra. Sa délocalisation sur les versants et les hautes terres, à la suite d'une réforme agraire aux résultats contestables et de la forte croissance démographique de la population paysanne, a entraîné une situation paradoxale. Le constat est en effet saisissant : l'élevage, extensif, se pratique sur les terres planes et fertiles des bassins et des vallées, dans les haciendas, alors que les versants difficiles d'accès, au fort potentiel érosif, portent un nombre croissant de petites parcelles de cultures, jusqu'à 3 800-4 000 m. Pour l'instant, le paysan n'a d'autre choix que de composer avec les conditions du milieu, le retour vers les basses terres fertiles étant tributaire d'une évolution politique dont il est difficile à priori d'évaluer la perspective. Affronter l'érosion qui s'accélère nécessite de mettre en œuvre des pratiques antiérosives efficaces, ce qui n'est pas le cas actuellement dans le minifundio. Cette carence pénalise fortement la durabilité de l'agrosystème.

Cette situation est l'aboutissement d'une évolution historique à la fois riche et troublée. En dépit de conditions naturelles difficiles et parfois extrêmes, la Sierra a depuis longtemps servi de refuge aux sociétés humaines et a joué un rôle historique majeur dans la constitution de l'État équatorien. Les contraintes physiques, loin de rebuter les hommes, les ont sécurisés par rapport aux zones tropicales, côtière ou amazonienne, perçues comme des régions répulsives et inhospitalières. Bien que les progrès de l'agriculture et de la médecine tropicale aient fait évoluer les mentalités au cours des dernières décennies, la Sierra a conservé son image de région phare et son rayonnement politique sur le pays¹.

¹ Depuis la création de la république d'Équateur, la ville de Quito, située dans la Sierra, est la capitale du pays. Malgré le formidable essor des productions tropicales d'exportation dans la Costa (bananes, café, cacao et parcs à crevettes) au cours des trente dernières années, liées à la présence de grands ports comme Guayaquil, la population de la Costa n'est que très légèrement supérieure à celle de la Sierra.

Régions	Recensement 1982			Recensement 1991		
	Population totale	Population urbaine	Population rurale	Population totale	Population urbaine	Population rurale
Sierra	47,36	43,03	51,51	45,9	42,62	49,92
Côte	48,84	55,42	42,53	49,29	55,37	41,81
Amazonie	3,8	1,55	5,96	4,81	2,01	8,27

TABLEAU I — Distribution en % de la population des trois grandes régions naturelles de l'Équateur par rapport à la population totale du pays et à la population urbaine et rurale, en 1982 et 1991 (INCE, 1991).

² Les faits retracés dans ce chapitre ainsi que les textes cités concernant ces trois périodes sont issus des ouvrages suivants : AYALA (1985), BARSKY (1980, 1984), BONIFAZ (1979), CHIRIBOGA (1986), DELER (1981), DELER *et al.*, 1983), DOLLFUS (1981), DONKIN (1979), GONDARD et LOPEZ (1983), KNAPP (1988), MURRA (1978), OBEREM (1981), PAREJA-DIEZCANSECO (1979).

Dans l'histoire de l'Équateur, l'utilisation des terres de la Sierra a été marquée par trois périodes clés (DE NONI, 1986)². Jusqu'à l'arrivée des Espagnols, les Andes équatoriennes étaient cultivées par des sociétés qui avaient su développer des stratégies agricoles adaptées aux conditions extrêmes de la montagne, sans dégradation des ressources naturelles.

Puis, durant deux périodes de rupture, l'érosion des sols a pris une ampleur considérable : la période coloniale a opéré une modification radicale des structures agraires ainsi que de l'usage des terres et des types de cultures ; la période contemporaine constitue la seconde phase de rupture, en raison du développement du minifundio et de son extension dans les cordillères.

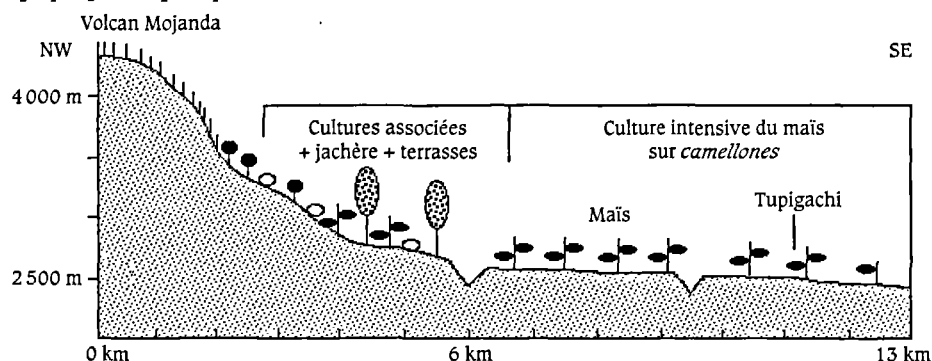
Ces différentes périodes sont illustrées par la figure 1 qui montre l'évolution spatiale des sols dans le secteur de Tupigachi, région de Cayambe, dans la partie nord du bassin de Quito. En effet, avant l'invasion du pays par les Incas d'abord puis par les Espagnols, la région de Tupigachi était peuplée par une confédération très puissante, les Quitus-Caras. On estime que la population s'élevait à l'époque (500 à 1500 apr. J.-C.) à environ 35 000 personnes. Cela témoigne déjà d'une pression démographique non négligeable si l'on songe que la population actuelle atteint 60 000 habitants pour le même espace (INCE, 1991). Aujourd'hui, cette région, l'une des principales zones d'élevage et de production laitière du pays, continue à occuper une place de choix dans l'économie du pays.

L'agriculture précoloniale

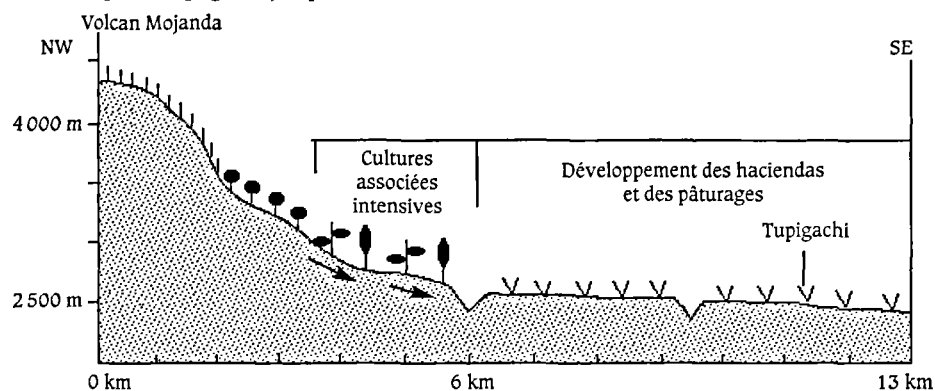
Très tôt les hommes se sont installés dans la Sierra. Des ateliers de taille d'outils d'obsidienne (BONIFAZ, 1979) indiquent un âge estimé à plus ou moins 10 000-15 000 av. J.-C. (régions du volcan Ilalo et de Cayambe-Cangahua). C'est durant les 1 000 ans qui précèdent la conquête espagnole (période dite de « l'intégration », de 500 à 1500 apr. J.-C.),

FIG. 1 — Évolution de l'utilisation du sol dans le bassin de Cayambe (région de Tupigachi)

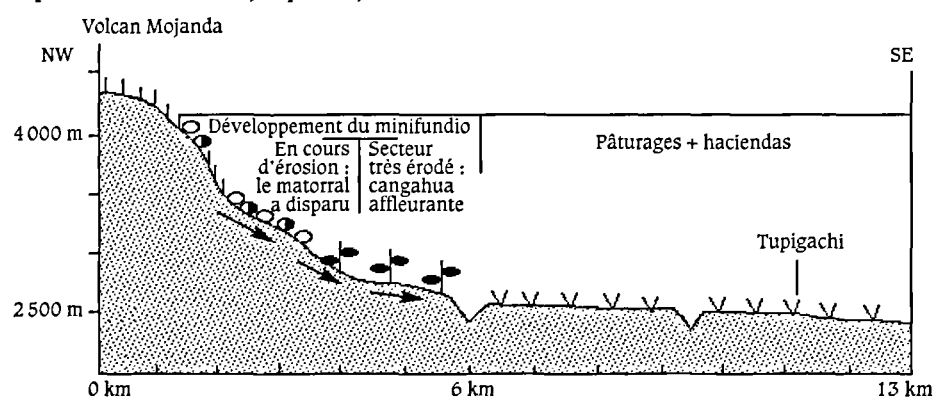
Époque pré-hispanique



De la conquête espagnole jusque vers les années 1960



Depuis les années 1960 jusqu'à aujourd'hui



- Érosion concentrée, décapage de la cangahua au pied du versant (< 3200 m)
- Accumulation des dépôts érodés
- ||| Paramo
- Matorral
- Pomme de terre
- Orge + Fève
- Maïs
- ▼ Pâturage
- Blé
- Végétation arborée

que l'agriculture a connu un développement spectaculaire (PAREJA-DIEZCANSECO, 1979). La Sierra devient le lieu privilégié d'évolution des sociétés d'agriculteurs, qui augmentent et diversifient leurs productions par une remarquable utilisation des pentes et des ressources naturelles.

En Équateur, l'influence des Incas dans ce processus a été moins déterminante qu'au Pérou ou en Bolivie. Fort éloignés de leurs bases méridionales situées sur les bords du lac Titicaca, ceux-ci n'ont exercé une domination réelle sur le pays que durant la période comprise entre 1450, date à laquelle ils colonisent le royaume Cañari, et 1534, correspondant à la conquête de Quito par l'Espagnol S. de Benalcazar. En arrivant dans les Andes équatoriales, les Incas affrontent des sociétés indigènes qui avaient déjà fait des progrès considérables en agriculture et qui utilisaient des méthodes très voisines des leurs. Parmi ces sociétés, on peut citer, tout particulièrement, la confédération des Quitus-Caras (Provinces actuelles de Carchi, Imbabura, Pichincha et Cotopaxi), les Puruhaes (Province de Chimborazo) et les Cañaris (Provinces de Cañar et Azuay).

Ces sociétés avaient développé des stratégies et des techniques bien adaptées aux pentes andines, dont voici les grands traits.

Des productions agricoles diversifiées, avec rotations et associations de cultures

Dans un milieu contraignant et avec une population nombreuse, les agriculteurs de cette époque ont su mettre en place une agriculture de montagne prospère. L'historien CIEZA DE LEÓN (1967 [1553]) relève : « Il y avait dans ce royaume, au temps des Incas, très peu de terres qui, paraissant fertiles, étaient désertes. Bien au contraire, tout était très peuplé, comme le constatèrent les premiers chrétiens qui y entrèrent [...] Ils transformaient les terres stériles en zones fertiles dans de nombreux endroits. »

La technique des « camellones », dont les vestiges sont encore visibles aujourd'hui (cf. coupe 1 fig. 1), a été mise au point par ces sociétés. Les camellones sont des levées de terre aménagées dans les fonds de bassin humides et marécageux, et séparées par des canaux où circulait l'eau. Les cultures se pratiquaient sur les levées, dont le sol était enrichi chaque année par un apport de terre fine provenant des canaux. KNAPP (1988) souligne que cette pratique laisse supposer une agriculture intensive répondant aux besoins d'une population déjà importante : il estime, en effet, que 100 à 150 journées de travail par homme et par an étaient nécessaires à l'entretien de ces ouvrages.

Ces sociétés ont su utiliser les bas-fonds et elles ont également rapidement pris conscience de l'existence d'une gamme étendue de microclimats, sur de courtes distances. Elles ont appris à exploiter l'étagement des

milieux en altitude. OBEREM (1981), à la suite de MURRA (1978), emploie le terme de « micro-verticalité » : chaque étage écologique était dédié à une culture spécifique, le maïs entre 2 000 et 3 000 m et la pomme de terre au-dessus de 3 200 m (fig. 1). Plusieurs variétés d'une même espèce étaient semées « pour garantir la récolte, certaines espèces supportant mieux le froid, d'autres la grêle et d'autres la sécheresse ou les parasites » (RAMÓN et LÓPEZ, 1981). Enfin, l'étage le plus haut était réservé aux pâturages d'altitude. L'élevage des lamas, animaux reconnus dès cette époque pour leur résistance au milieu, se développa : ils étaient utilisés à la fois comme animal de trait et de boucherie.

Ces sociétés avaient vraisemblablement compris l'intérêt des rotations et des associations de cultures pour préserver la richesse des sols. Pour maintenir de bons rendements, le maïs, alors considéré comme la culture principale, objet de rites religieux voués au dieu Soleil, était souvent associé à d'autres cultures, haricots et quinoa (*Chenopodium quinoa*), qui sont d'excellents engrais verts. La rotation des cultures était également de règle. Après deux ou trois récoltes, les terres agricoles étaient mises en jachère, longue parfois de dix ans. R. A. DONKIN (1979) rapporte que, dans l'étage froid (altitude > 3 200 m), l'association de tubercules — pommes de terre, oca (*Oxalis tuberosa*) et ullucu (*Ullucus tuberosus*) — était remplacée par d'autres variétés de quinoa et par la canahua (*Chenopodium pallidicaule*). Dans les zones forestières, les moyas, la coupe du bois faisait l'objet d'une législation rigoureuse.

Ce contrôle reposait sur l'édification de terrasses de culture, ou *andenes*. PRESCOTT (1847) souligne : « Sur pentes faibles, les *andenes* pouvaient atteindre cinquante, cent, voire deux cents pieds de large [...] ils se rétrécissaient considérablement à trois ou quatre pieds de large sur les pentes raides et parfois moins que cela dans les secteurs les plus escarpés [...] les talus étaient composés par des pierres sèches qui s'ajustaient les unes aux autres à la perfection. »

DONKIN (1979) confirme dans ses recherches la maîtrise de cette technique par les sociétés locales. Il rappelle le texte de F. Pizarro : « Tous les terrains montagneux sont modelés en forme d'escaliers de pierre. » Grâce aux *andenes*, il était possible de cultiver les versants en contrôlant les pertes en terre et d'apporter de l'eau là où cela était nécessaire, les *andenes* étant alors dotés d'un réseau de canaux d'irrigation. Ces derniers, alimentés par des rivières, des lacs, des sources thermales, avaient donné lieu à des travaux parfois gigantesques : « Ils exploitent au maximum l'eau des rivières, irriguant ainsi un grand nombre de terres

Le contrôle de l'eau et de l'érosion

et les travaux de creusement des canaux étaient les plus grandioses et admirables qui existaient sur ce continent parce qu'ils avaient été réalisés sans outil spécialisé. » (Pizarro, *in* BARNABÉ COBO, 1956). « Les canaux pouvaient mesurer jusqu'à 120 lieues de long, environ 600 km » (MURRA, 1978).

Les travaux de KNAPP (1988) soulignent aussi que l'association maïs-pommes de terre sur le versant ainsi que, plus haut, les cultures de pommes de terre étaient réalisées sur des terrasses de type *andenes* (coupe 1 de la fig. 1).

L'utilisation des engrais

Une attention particulière était portée à la fertilité des sols. « La taille du maïs à la récolte dépendait de l'emploi du guano, transporté dans la Sierra à dos de lama, mais aussi de l'utilisation d'excréments humains séchés et pulvérisés. » (CIEZA DE LEÓN, 1967 [1553]). Pour amender les champs, les agriculteurs de l'époque pouvaient aussi utiliser des têtes de poissons séchés. Par ailleurs, ils n'hésitaient pas à charrier des volumes considérables de terre pour enrichir les sols : « Certaines montagnes étaient si rocheuses que les Incas se virent obligés, après avoir construit les terrasses, de les doter d'une couche épaisse de terre avant de pouvoir les cultiver » (PRESCOTT, 1847).

L'agriculture coloniale

La conquête espagnole introduit au XVI^e siècle l'élevage bovin, de nouvelles cultures et techniques culturales, regroupe les populations dans le cadre de grands domaines agricoles de type seigneurial, les haciendas, et ravage le système ancestral. Les paysans et les activités agricoles se concentrent désormais dans les bassins interandins, tandis que les versants ne sont utilisés que ponctuellement. Ce bouleversement profond de l'organisation agricole et sociale indigène a de graves conséquences.

Une forte diminution de la population indigène

Ce phénomène est attesté par les recensements de population effectués à l'occasion du paiement du tribut auquel les indigènes étaient soumis par les Espagnols. Dans les villes de Quito, Cuenca, Loja, Zamora et Quijos, la population indigène diminue fortement : DELER (1981) estime qu'elle est passée de 80 000 personnes en 1557-1561 à 30 000 en 1591-1608. Plus précisément, à Tupigachi-Cayambe (fig. 1), où les Quitus-Caras opposèrent une farouche résistance, LARRAIN-BARROS (1980) estime, pour la période indiquée précédemment, que la population a

été divisée par quatre, passant de 35 000 personnes à moins de 10 000. À Latacunga, à une centaine de kilomètres au sud de Quito, la population, de 2 000 personnes en 1663 ne serait plus que de 700 en 1758, et à Chimbo, petite ville située au sud-ouest de Latacunga, elle serait passée de 1 200 personnes en 1596 à 800 en 1650 (DELER, 1981).

Les historiens s'accordent pour expliquer cette évolution par les affrontements guerriers, les effets des épidémies venues d'Europe et les terribles conditions de travail auxquelles les populations étaient soumises. « À partir du XVII^e siècle, la crise démographique qui affecte les groupes indigènes est notable. La cruelle spoliation occasionnée par les Espagnols et l'introduction de maladies inconnues alors en Amérique ont décimé les indigènes » (PEREZ, 1947). Face à une opposition très affaiblie, les conquistadores ont imposé rapidement un nouveau schéma d'organisation de l'espace : « La diminution très forte de la population indigène et l'affaiblissement des communautés permettent aux Espagnols d'augmenter considérablement leur domination sur la terre » (CHIRIBOGA, 1986).

Pour affirmer leur domination, les Espagnols regroupèrent de manière forcée les indigènes dans les zones de plaines et de vallées. C'est le système de l'*encomienda* qui conduit progressivement à la mise en place des haciendas, concentrées dans les bassins et les vallées andines (1 500-3 000 m). Dans ce système, les indigènes, assujettis à un « maître », constituaient une main-d'œuvre servile et aisément contrôlable : « En même temps que les Espagnols étendent leur domination spatiale, ils regroupent comme du bétail sur les terres conquises et devenues propriétés privées des familles d'indigènes pour travailler les champs et servir les maîtres » (RUBIO ORBE, 1987). L'organisation ethnoculturelle indigène, fondée sur l'exploitation « microverticale » des versants et sur le culte de la Pachamama, la « terre-mère », est totalement anéantie.

Sur la coupe 2 de la figure 1, les pâturages s'étendent dans le bassin, les céréales sont cultivées sur le pourtour. Les arbres ont disparu des premières pentes et l'érosion se développe.

Le but initial des conquistadores n'était pas de conquérir des terres agricoles. Leur mission première était d'exploiter les ressources minières afin d'enrichir la Couronne d'Espagne. Dans ce « Nouveau Monde », présumé très riche, nommé « *El Dorado* », on recherchait principalement

L'asservissement des populations

La mise en place de l'agriculture « castillane »

de l'or. Après quelques tentatives, peu fructueuses dans l'ensemble, d'exploitation de gisements aurifères dans la Sierra centrale (Cuenca Gualaceo) et dans les zones de piedmont (Zaruma, Zamora et Macas), l'activité minière fut progressivement délaissée au profit de l'agriculture. Des compensations avantageuses étaient proposées à ceux qui voulaient bien quitter l'Espagne pour coloniser ces nouvelles terres. A. GIMENO (1974) relate l'exemple suivant : « Les personnes, qui avaient été reconnues aptes pour le service des armes et qui étaient volontaires pour une affectation de cinq ans dans la république de l'Équateur, recevaient à la fin de leur mission 10 fanègues (1 fanègue = 64,6 ares) de terre en propriété perpétuelle, une paire de bœufs et une vache ». En supplantant les traditions locales ancestrales, l'agriculture castillane s'est imposée radicalement. Ses principaux apports se sont opérés dans les trois domaines suivants.

*L'introduction
de nouvelles cultures*

Sur de vastes superficies furent installées de nouvelles cultures provenant d'Espagne, notamment : arbres fruitiers (agrumes, pommes, pêches, abricots, vigne), cultures maraîchères (choux, oignons, carottes, salades, petits pois, etc) et céréales (blé, orge et avoine).

*Le développement
de l'élevage*

L'activité pastorale se développa d'une manière spectaculaire grâce à l'introduction d'animaux inconnus jusqu'alors. Les nouveaux cheptels bovins, ovins, porcins, chevalins augmentèrent rapidement : au début du XVII^e siècle, on compte environ 2 000 000 de têtes de moutons entre Ibarra et Alausi. Outre la production de viande et de lait, l'élevage donna naissance à une activité textile florissante (les *obrajes*).

*La mise en œuvre
de nouvelles
pratiques agricoles*

Parmi celles-ci, l'une des premières est l'utilisation systématique de la traction animale pour le travail du sol. Les labours relativement profonds étaient réalisés aisément par une seule personne en un temps minimal. Cette nouvelle technique de culture s'opposait radicalement aux pratiques communautaires indigènes, manuelles et « à ras du sol ». Avant l'arrivée des Espagnols, « labourer la terre était la plus grosse tâche à accomplir, ce travail se réalisait dans le cadre d'un système totalement communautaire avec des groupes d'hommes, qui soulevaient les mottes de terre, et de femmes, qui étaient chargées de les écraser au rythme des chansons » (PRESCOTT, 1847). « L'emploi de la *taclla* (bâton en bois incurvé) permettait de soulever les mottes de terre puis de les écraser [...] la structure du sol était peu altérée, sinon sur les 15 premiers centimètres. » (DOLLFUS, 1981).

Au choc de la conquête succède, à la fin du siècle dernier, celui de l'explosion démographique : la population décuple en moins d'un siècle, passant d'un million d'habitants à 12 millions de nos jours. Les structures agricoles coloniales deviennent caduques. Pour désamorcer une crise sociale, le gouvernement abolit l'état de servitude et promulgue les lois de réforme agraire (1964 et 1974).

L'agriculture délocalisée en altitude

Les effets de la conquête espagnole ont été durables jusqu'à la première vague de réforme agraire dans les années soixante. Jusqu'à la réforme, les terres étaient regroupées dans les grands domaines des haciendas. Elles étaient travaillées par des paysans pauvres, qui formaient une *importante main-d'œuvre servile et qui ne possédaient que de toutes petites parcelles louées ou prêtées par les maîtres de l'hacienda*. Ce type de paysannat est à l'origine du minifundio.

Les structures agraires avant 1960

La gestion des terres et des hommes était donc contrôlée par un petit groupe d'individus : il y a encore trente ans, les exploitations supérieures à 20 ha, bien que ne regroupant que 10 % du nombre total d'exploitations, représentaient plus de 80 % des terres cultivées. Parmi celles-ci, 60 % environ correspondaient à d'immenses domaines supérieurs à 500 ha : des volcans entiers, dont quelques-uns dépassent 5 000 m d'altitude, pouvaient se trouver englobés dans les limites de l'hacienda. Sur la coupe 2 de la figure 1 figurent les possessions des haciendas au fond du bassin et sur la partie basse du versant du volcan Mojanda.

L'utilisation des sols était largement extensive. L'essentiel de la production se trouvait concentré sur les terres fertiles du bassin interandin (entre 1 500 et 3 000 m), sur les interfluves et les terrasses alluviales, où l'on pratiquait l'élevage bovin et localement la culture céréalière (blé et surtout maïs). On estime que 80 % des terres appartenant à des haciendas de plus de 100 ha n'étaient pas cultivées. Il s'agissait principalement des terres situées au-dessus de 3 000-3 200 m, sur des pentes vigoureuses (40 %-70 %), entrecoupées de profondes *quebradas*. Ces portions de versants étaient précédemment bien couvertes par la végétation « naturelle » arbustive du matorral et herbacée (*Stipa ichu*) du paramo.

À partir des années soixante, des mutations profondes vont faire évoluer ce système. Le mécontentement social, aggravé par une forte croissance démographique entraîne une loi de réforme agraire promulguée en deux fois, en 1964 puis en 1974 (BARSKY, 1980, 1984 ; COSTALES ET COSTALES, 1971). L'État ne s'oppose pas à ce processus dans sa globalité,

Les mutations agraires et la délocalisation du minifundio

les gouvernants de l'époque préférant se tourner vers d'autres centres d'intérêt (cultures d'exportation sur la Côte et pétrole amazonien) plutôt que de s'enliser dans un conflit social difficile à gérer.

La réforme agraire abolit l'état de servitude (le *huasipungo*) auquel était soumise l'abondante main-d'œuvre des haciendas et contraint les grands propriétaires terriens à renoncer à leurs privilèges féodaux et à faciliter la cession de terres au petit paysannat.

Le *huasipunguero* devient donc un homme libre et propriétaire d'un terrain, mais dans des conditions particulièrement difficiles. En effet, les « hacendados » bloquent l'attribution de bonnes terres (bassins et bas de versant), malgré la présence de zones non utilisées, et orientent les cessions de terres vers les zones situées au-dessus de 3 000-3 200 m d'altitude, provoquant ainsi un transfert massif de population sur les versants puis sur les hautes terres. Le processus majeur de mutation est en cours et, dès son départ, il confine le minifundio à la marginalité : d'un point de vue agronomique d'abord, car la nature est plus contraignante à cette altitude que dans les zones plus basses et plus fertiles où le petit paysan a acquis une expérience de travail du sol ; d'un point de vue socio-économique ensuite, considérant que ces hautes terres, difficiles d'accès, sont déconnectées des circuits commerciaux traditionnels (FARELL et DA ROS, 1983).



Avant 1960, les versants et les hautes terres de la cordillère étaient sous le contrôle des haciendas et les terres n'étaient que peu utilisées. Après cette date, sous la pression démographique et sociale des petits paysans, le minifundio se délocalise en altitude et se développe massivement sur ces zones : les parcelles de cultures, consacrées à la trilogie orge/fève/pomme de terre, sont de petite taille et contiguës, formant une sorte de damier multicolore et bocager ; les densités humaines sont comprises entre 50 et 200 hab. km⁻².

La délocalisation du minifundio en altitude a contribué à modifier profondément les caractéristiques initiales de la végétation naturelle ainsi que le mode de fonctionnement de l'écosystème d'altitude. Cette évolution a donné lieu à la création d'un damier très dense de parcelles de cultures consacrées principalement à l'autosubsistance, la vente au marché n'étant envisagée qu'exceptionnellement pour écouler des surplus de récoltes. L'élevage est peu répandu : son développement est limité tant par le manque de capitaux nécessaires au paysan pour acheter des bêtes que par l'exiguïté des parcelles. Dans les minifundios les mieux nantis, l'élevage, lorsqu'il existe, est pratiqué sur les terres de parcours en indivision. Les surfaces cultivées sont de petite taille, la parcelle unitaire dépasse rarement 1 ha. Les exploitations sont relativement morcelées : un propriétaire possède normalement plusieurs parcelles et la surface totale des parcelles par famille est inférieure en général à 20 ha. On peut trouver, cependant, quelques familles mieux nantis dont les terres sont comprises entre 20 et 40 ha. Leur nombre semblerait en progression (cf. tabl. II).

Il n'y a aucune limite de pente pour cultiver, seule l'absence de sol constitue une limite. On constate, en effet, que le minifundio continue son expansion y compris sur des versants découpés par un réseau dense de profondes gorges, les pentes des versants atteignant fréquemment 70 %, voire 100 % (DE NONI et VIENNOT, 1985).

En Équateur, les Andes sont dédoublées en deux cordillères séparées par une dépression centrale formée d'une enfilade de bassins plus ou moins grands.
L'usage des terres montre un paradoxe saisissant : les cultures du minifundio se trouvent sur les versants et les hautes terres où les contraintes agronomiques sont maximales alors que l'élevage extensif se pratique sur les terres planes du bassin.
Ici, les pâturages du bassin de Quito : une partie de la ville est visible au centre de la photo ; à l'arrière-plan, on distingue les versants et les cultures du volcan Pichincha.



Les conséquences sur les structures agraires

L'inégalité des structures agraires

Actuellement, la Sierra est la région du pays où la pression de l'homme sur la terre est la plus forte. On y observe les plus fortes densités rurales. Celles-ci peuvent varier de 50 à plus de 200 habitants au kilomètre carré. En règle générale, les plus fortes densités de population correspondent au minifundio. Les recensements agricoles réalisés par le ministère de l'Agriculture permettent de regrouper les unités de production par grandes classes de taille et d'évaluer leur importance en nombre et en superficie. Parmi les statistiques agricoles fiables et accessibles, nous avons utilisé celles de la période comprise entre 1954 et 1985 (tabl. II et III).

On remarquera que les petites propriétés sont largement majoritaires : elles regroupent plus de 80 % des unités de production. Ressort également une inégalité très marquée dans la distribution des superficies par taille d'exploitation : le minifundio n'occupe dans le meilleur des cas, en 1985, que 20 % des terres agricoles, ce qui entraîne une pression d'autant plus forte de l'homme sur le sol.

L'occupation actuelle des sols est un bon indicateur de l'inégalité qui oppose haciendas et minifundios depuis la réforme agraire, et révèle une situation agronomique paradoxale. D'une part, on trouve des haciendas, tournées principalement vers l'élevage, installées sur les terres planes, facilement exploitables, des bassins interandins. La gestion du cheptel bovin, très extensive, vise à occulter la présence de terres inexploitées afin d'éviter l'extension du minifundio dans cette partie de la Sierra. Le nombre de têtes par hectare est passé de 1,1 en 1972 à 0,7 en 1985 alors que, pendant la même période, la superficie des pâturages augmentait considérablement. D'autre part, on constate avec l'installation du minifundio en altitude que les cultures ont quasiment disparu des bassins et se trouvent dorénavant sur les versants et les hautes terres, où l'agriculteur est confronté à des contraintes agronomiques importantes.

Malgré les efforts du paysannat pour orienter le minifundio vers les cultures alimentaires de base — céréales (maïs, blé et orge) et tubercules (pomme de terre) —, la situation actuelle est précaire. Selon les régions, l'autosubsistance est à peine garantie ; quant aux excédents de production,

Taille en ha	1954		1974		1985	
	Nombre	Superficie	Nombre	Superficie	Nombre	Superficie
0 - 20	89,86	16,63	85,31	18,54	83,5	20,4
20 - 100	8,06	18,15	12,48	33,52	15,3	44,4
> 100	2,08	64,39	2,13	47,94	1,3	35,2

Tabl. II — La structure agraire en Équateur de 1954 à 1985 : Nombre d'exploitations et superficies occupées en % (MAG, 1954-1985)

Tabl. III — La production agricole dans la Sierra de 1970 à 1985 (en milliers de tonnes).

Cultures	1970	1975	1980	1985
Orge	79	63	24	27
Maïs	168	90	45	35
Blé	81	64	31	18
Pomme de terre	542	499	323	423

ils sont rares et se heurtent parfois à des systèmes de subvention gérés par l'État ; les données du ministère de l'Agriculture sur l'évolution de la production agricole de 1970 à 1985 sont révélatrices de cet état de crise (tabl. III).

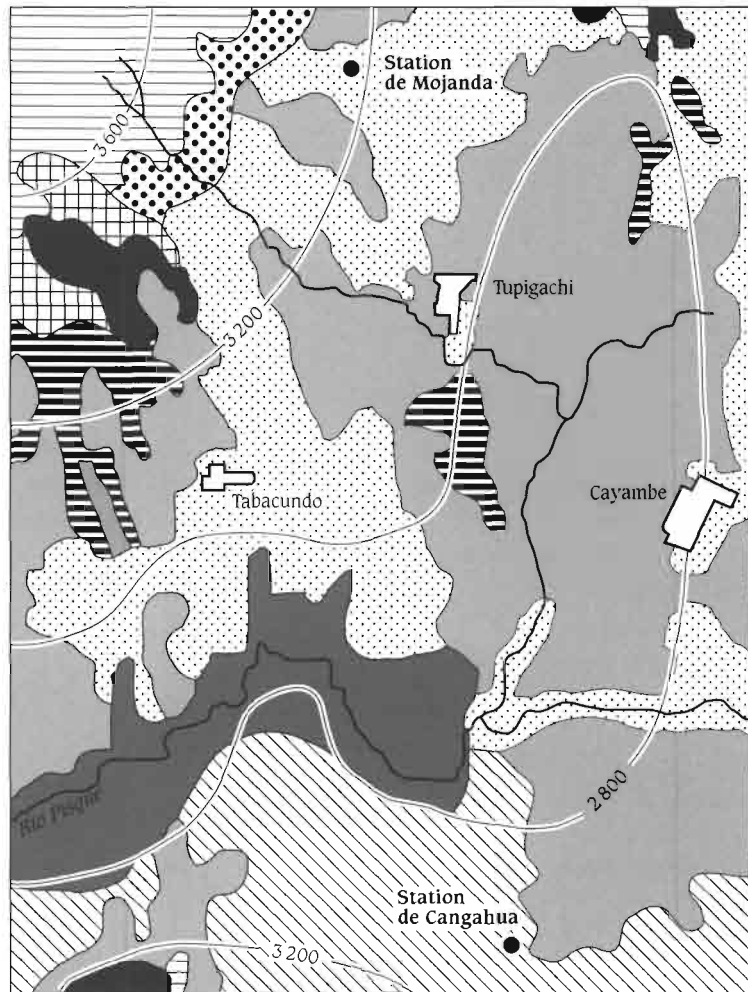
On notera que la baisse de la production agricole est générale et vertigineuse pour toutes ces cultures entre 1970 et 1980. Elle est moins marquée entre 1980 et 1985, période pendant laquelle on observe même une légère reprise de la production d'orge et un accroissement net pour la pomme de terre. Il semblerait que le palier inférieur de production de ces deux cultures ait été atteint au cours de la décennie précédente. En revanche, la production de maïs continue à décroître et la chute de celle du blé est toujours aussi spectaculaire, même si cela peut s'expliquer par un transfert vers l'amont de l'agriculture vivrière, contrainte de produire d'autres cultures mieux adaptées à la montagne et au froid. Le blé a subi les contrecoups de choix politiques qui ont nui aux intérêts du minifundio. Au cours de la décennie passée, l'État a opté pour une politique d'importation de blé en provenance des USA et de subventions des grains auprès des distributeurs locaux. En 1985, la tonne de blé en provenance des USA coûtait 21 351 sucres (1 dollar = 120 sucres à cette époque) à l'État équatorien qui le revendait 11 900 sucres aux distributeurs locaux. L'État prenait donc à sa charge 44 % du prix initial de la tonne (PELTRE-WURTZ, 1989).

Le minifundio ne peut lutter devant une telle disparité et éprouve dans ce contexte d'énormes difficultés à s'affranchir de la misère et de la dépendance alimentaire. On estime que 90 % environ des familles du minifundio vivent dans des conditions de pauvreté absolue (moins de 2 500 calories et 45 g de protéines par personne et par jour).






Confrontés, sur des parcelles en général exiguës, à des contraintes naturelles importantes, les hommes du minifundio sont tenus pour survivre de travailler très intensivement le sol. Cette évolution s'accompagne d'une érosion accélérée, dont les manifestations sont appréciables à plusieurs échelles.

Une érosion accélérée





CARTE 5 — Utilisation des sols dans le bassin de Cayambe à la suite des modifications agraires intervenues entre 1938 et 1988

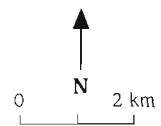


Zones sans modifications depuis 1938

-  Terroirs riches conservés par les haciendas (élevage bovin sur mollisols)
-  Végétation herbacée (paramo)
-  Végétation arbustive (matorral)
-  Eucalyptus
-  Cañon du río Pisque

Zones modifiées entre 1938 et 1988 où l'érosion a augmenté fortement

-  Zone dense de minifundio (andosols) cédée par les haciendas (orge, fève, pomme de terre)
-  Terroirs pauvres (maïs + végétation naturelle) de minifundio abandonnés par les haciendas (cangahua)
-  Paramo mis en culture par le minifundio
-  Matorral mis en culture par le minifundio



—2.800— Courbe de niveau en mètres, au-delà de 2 800 m les pentes sont supérieures à 20 %

À l'échelle du versant, l'hacienda ne possède plus que le fond du bassin où l'on continue à pratiquer l'élevage (cf. coupe 3 de la figure 1). Le minifundio occupe le versant du volcan Mojanda : le pied du versant, en monoculture de maïs, est cultivé de longue date et montre des signes importants d'érosion (affleurements de cangahua). La partie médiane du versant, au-dessus de 3 200 m, est occupée par des parcelles d'orge, de pomme de terre et de fève qui ont remplacé totalement la végétation arbustive du matorral. Sur la partie supérieure du versant, au-delà de 3 600 m, les défrichements se poursuivent. Ces derniers se sont effectués aux dépens du paramo et portent quelques parcelles de cultures (orge, fève, pomme de terre également).

À l'échelle du bassin de Cayambe, on retrouve l'évolution notée sur la coupe de Tupigachi. Nous nous appuyons sur la carte 5, réalisée à partir d'anciennes cartes topographiques et de photographies aériennes³, qui montre les transformations agraires intervenues dans cette région entre 1938 et 1988 (DE NONI *et al.*, 1995). La légende met en relief les conséquences spatiales des mutations agricoles sur les versants et les hautes terres. À cette échelle, on note, comme précédemment, que le minifundio occupe massivement, à partir de 3 000-3 200 m, les terroirs de versants cédés par les haciendas durant la réforme agraire, celles-ci se cantonnant sur les bonnes terres du bassin (2 800-3 000 m). On remarque, enfin, que l'expansion du minifundio s'est effectuée en altitude jusqu'à 3 600 m, aux dépens des formations végétales « naturelles » du matorral et du paramo et s'accompagne d'une érosion accélérée qui progresse rapidement.

À l'échelle régionale de la Sierra, la carte 6 retrace les grands types d'utilisation actuelle des sols dans la Sierra et confirme l'ampleur des transformations dans toute la région (GONDARD, 1982). Entre 1 500 et 3 000 m, la culture principale est le maïs, associé fréquemment au haricot grim pant et plus ponctuellement à la fève. Plus haut sur le versant, le maïs a été remplacé par une production diversifiée et mieux adaptée aux conditions climatiques : orge, pomme de terre, fève, lupin, quinoa et plus rarement oignon, modification qui accélère l'érosion. Le matorral ne forme plus une bande continue et le contact entre la formation qui le surmonte, le paramo, et les cultures se fait le plus souvent directement. Dans l'étage du paramo, les cultures sont peu développées encore et la végétation herbacée demeure très couvrante.

Néanmoins, les principaux dangers de réactivation de l'érosion résident dans la pratique de l'élevage et des brûlis fréquents du paramo pour améliorer l'appétence de l'herbe. Cet élevage, extensif pour l'instant, est

³ Les cartes utilisées sont les premières cartes topographiques réalisées en Équateur par l'Institut géographique militaire avec l'assistance d'ingénieurs géographes espagnols. Elles datent des années 1930-1940 et se distinguent par la qualité de leurs informations (échelle 1 : 50 000) : outre les courbes de niveaux, elles contiennent des données sur l'utilisation des sols, la végétation et les zones dégradées. Pour le reste de la période, on a eu recours à l'interprétation stéréoscopique de photographies aériennes des années soixante et quatre-vingt, à l'échelle 1 : 60 000.

constitué d'ovins et de caprins, parfois de lamas, et peut atteindre 4 200-4 400 m. Au-delà, la végétation disparaît pour laisser place à la roche puis aux neiges pérennes. La figure 2 présente l'étagement de la végétation sur une coupe qui traverse, d'est en ouest, les volcans Cotopaxi et Illiniza.

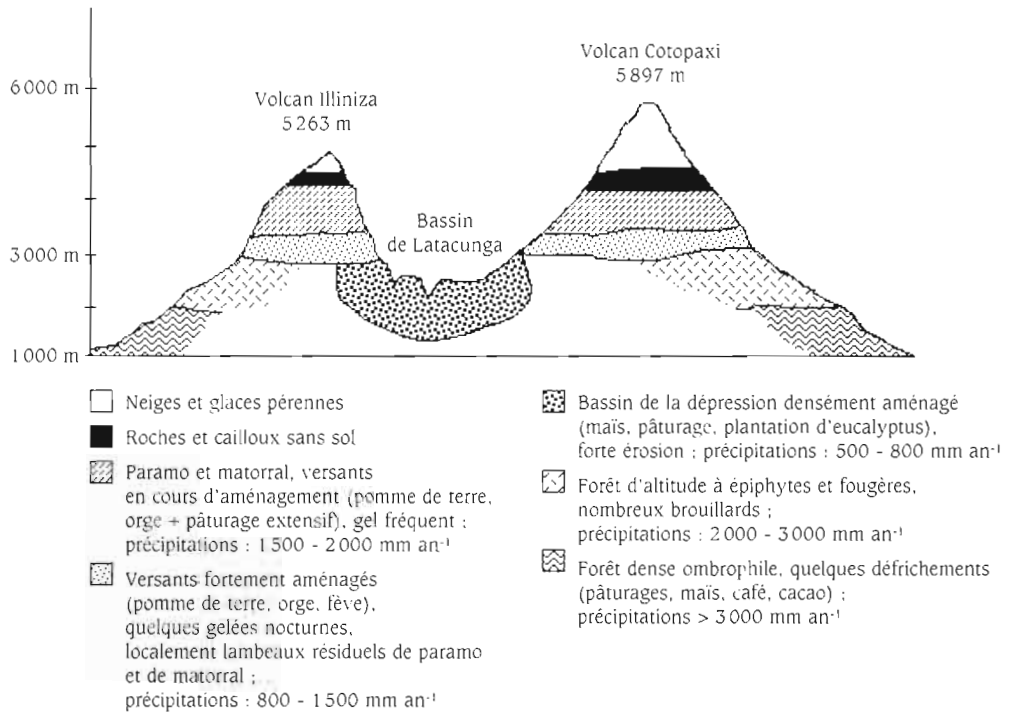


Poussés par la nécessité de nourrir une population en forte croissance démographique, les petits paysans du minifundio luttent en permanence contre les contraintes naturelles imposées par la haute montagne tropicale.

Il n'y a pas vraiment de limite de pente pour cultiver si ce n'est l'absence de sol sur le versant ou comme ici, dans la région de Quilotoa (3 600-3 800 m), la présence d'une zone tourbeuse autour d'un petit lac, témoin de l'empreinte glaciaire autrefois.

La végétation naturelle dominante est le « paramo » (*Stepa ichu*), formation herbacée d'altitude.

FIG. 2 —
Étagement de
la végétation
dans la Sierra
pyroclastique

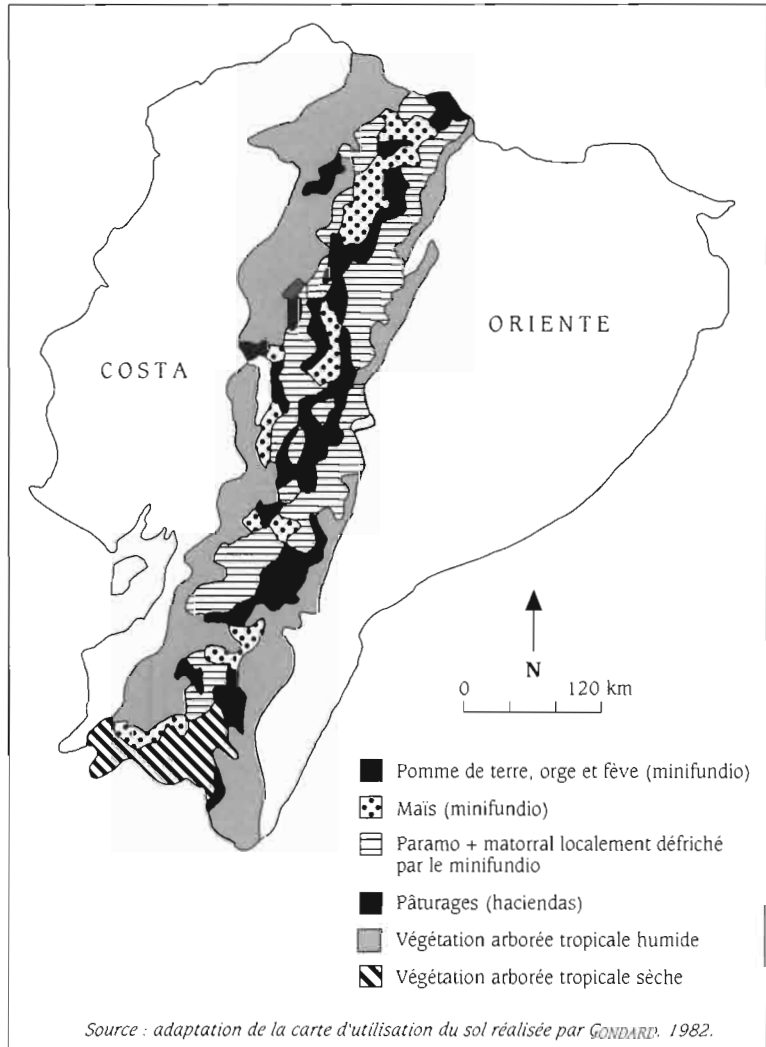


La mutation du minifundio en altitude a provoqué de profondes transformations au sein de la végétation naturelle, modifiant le comportement et le fonctionnement de l'écosystème. Ici, dans la région de Cayambe où se termine au nord le bassin de Quito, la végétation naturelle de type arbustive, appelée « matorral », caractéristique de l'étage andin tropical entre 3 400 et 3 800 m, a disparu en grande partie au profit des cultures.



L'érosion accélérée des sols est importante dans les zones cultivées du minifundio. Son importance est liée au contexte physique de la Sierra, montagne tropicale naturellement dynamique. Elle est également associée au facteur socio-économique, au poids de la démographie et aux modifications de l'utilisation de l'espace. L'absence de stratégies antiérosives traditionnelles et la mise en œuvre de certaines actions inadaptées au milieu contribuent également à l'accélération de l'érosion.

CARTE 6 —
Principaux types
d'utilisation des sols
de la Sierra



Le constat d'échec de la lutte antiérosive dans la Sierra

En montagne, les risques d'érosion sont plus élevés que dans d'autres milieux car les composantes de l'environnement physique, notamment la pente, exercent une influence forte sur la dynamique de l'érosion. La Sierra n'échappe pas à ce constat général, et le fait d'y trouver les marques d'une érosion active ne doit donc pas surprendre. Ce qui peut surprendre, en revanche, c'est la présence d'une population agricole assez dense qui a favorisé l'anthropisation des paysages alors que les montagnes, du fait des nombreuses contraintes qu'elles présentent pour la mise en valeur des sols, sont des milieux en général peu peuplés. En effet, l'agriculture, lorsqu'elle existe en montagne, est orientée le plus souvent vers l'élevage qui s'y pratique de façon extensive et donc peu dégradante pour les sols, ce qui n'est pas le cas de la Sierra équatorienne.

En outre, l'absence quasi totale de stratégies et de méthodes antiérosives, dans un milieu naturellement fragile qui en présente la nécessité, eu égard à la pression humaine existante, est un autre élément qui aggrave l'érosion des sols. Cet aspect des choses est d'autant plus problématique dans les montagnes tropicales que le domaine des sols cultivables est plus étendu en altitude qu'à des latitudes tempérées, où le froid limite très rapidement l'extension en hauteur des activités agricoles. Les possibilités et les tentations de défricher les hautes terres sont donc plus grandes sous les tropiques, mais plus forts sont les risques de dégradation du milieu si le travail de la terre n'est pas réalisé avec des méthodes adaptées et différentes de celles utilisées dans les régions basses.

La lutte antiérosive dans l'agriculture de la Sierra

Par les paysans du minifundio

Le bilan est globalement négatif et s'appuie, d'une part, sur les résultats d'enquêtes menées dans le minifundio, dont l'action dans le domaine de la lutte antiérosive est très limitée, et, d'autre part, sur quelques tentatives de l'État, à l'origine de projets localisés et déconnectés du monde paysan.

Des enquêtes ont été réalisées dans le minifundio pour connaître la perception des paysans sur l'ampleur et les causes de l'érosion des sols et analyser leurs comportements face à ce phénomène. Elles ont été menées dans plusieurs zones de la Sierra, en privilégiant celles où les parcelles de cultures portaient les marques de l'érosion.

Les résultats de ces enquêtes ont permis de cerner le comportement du paysan, tant en ce qui concerne la perception de l'érosion que les moyens traditionnels de lutte. Il en ressort principalement la faible implication du paysan dans la lutte antiérosive. La quasi-absence d'aide extérieure, en cantonnant le paysan dans des conditions d'existence qui se dégradent, constitue un autre facteur important qui influe sur l'accentuation de l'érosion. Lorsque l'érosion menace, le seul recours du paysan est souvent d'évoquer la fatalité divine à l'origine d'événements climatiques catastrophiques (DE NONI *et al.*, 1986 b). À titre d'exemple, dans la région de Cangahua, où les pluies érosives sont très souvent accompagnées de grêle, c'est la Vierge Maria Trinidad qui est mise en cause : « Pour la quasi-totalité des habitants de la région sinistrée, la grêle de mars 1982 est une punition infligée par la Vierge Maria Trinidad qui, depuis quelques années, apparaît à quelques privilégiés au sommet d'une montagne proche appelée Jambi Machi [...] Dans ces conditions, les mesures à prendre sont évidentes : il s'agit d'organiser un pèlerinage de toutes les communautés du voisinage jusqu'à Jambi Machi. » (FAUROUX, 1989). Le paysan semble donc relativement résigné et passif face aux manifestations atmosphériques qui traduisent pour lui un déchaînement de forces à la fois naturelles et surnaturelles qui activent l'érosion des sols. Des méthodes simples, comme celle du labour tracé selon le sens des courbes de niveau, très utile lorsque le relief est en pente, ne sont pas utilisées. En général, il n'y a pas de direction définie pour le sens du labour, si ce n'est lorsqu'il est effectué par traction animale. Dans ce cas, le paysan fait suivre aux animaux les courbes de niveau, non pour protéger le sol contre l'érosion, mais pour économiser la santé des bêtes, qui représentent un capital plus important que la terre. Ce cas reste isolé néanmoins, car le petit paysan ne dispose pas, dans la plupart des cas, d'un capital suffisant pour acheter des bêtes.

On est surpris sur le terrain par le faible nombre d'animaux présents dans le paysage de minifundio. Cela explique que la pratique du compost soit réduite. Le prix des engrais chimiques est trop élevé également, ce qui ne permet pas à l'agriculteur de lutter contre la baisse de fertilité des sols. L'emploi d'engrais, s'il se fait, est en général très irrégulier et les doses en sont insuffisantes.

Autrefois,
les sociétés préhispaniques
utilisaient un simple bâton,
la *chakitacla*,
pour enfouir les semences
sans retourner le sol.
Par la suite,
les paysans du minifundio
ont adopté l'*asadon*,
sorte de houe locale
munie d'une large lame
qui permet de travailler
le sol sur 15-20 cm
de profondeur.
Son utilisation est adaptée
aux sols de la Sierra
issus de cendres
volcaniques fines
et meubles.



Le labour motorisé ainsi que le labour manuel, effectué avec l'*asadon*, la houe locale, sont réalisés en règle générale dans le sens de la plus grande pente. De plus en plus fréquemment, le paysan pratique le labour mécanisé. Le tracteur est loué à une coopérative ou à un grand propriétaire et il est utilisé de façon communautaire par un groupe d'agriculteurs. Les risques d'accident sont élevés en raison de l'inclinaison des pentes : dans la province de Chimborazo, où la pression du minifundio sur la terre est très forte, nous avons observé la présence de tracteurs sur des versants pouvant atteindre 60 % de pente. L'introduction de la mécanisation a contribué à agrandir la taille des parcelles et à faire disparaître les anciens paysages agraires bocagers. L'abandon ou la destruction systématique d'anciens ouvrages agricoles deviennent donc la règle : la plupart, de type « terrasse », hérités des sociétés précolombiennes, avaient pour fonction de contrôler en partie les effets du ruissellement et de l'érosion. Ces vestiges, relativement nombreux dans toute la Sierra (GONDARD et LOPEZ, 1983), sont constitués par des talus de pierres ou de blocs de cendres indurées. À Pimampiro (Province de Imbabura), les talus sont volontairement abattus pour laisser la place à de grandes parcelles mécanisables. À proximité de Zhud (province de Cañar), dans une zone de colonisation récente et de moyenne propriété, de larges terrasses au profil concave, témoins de l'ancienne civilisation Cañari, apparaissent sous le « chaparral » (autre terme en usage pour désigner le matorral) en cours de défrichement. Là aussi, ces ouvrages sont détruits pour agrandir la taille des champs. À Punín et à Flores, ainsi qu'à Colta et Chunchi (Province de Chimborazo), dans des conditions de pente déjà forte (40 %-60 %) et à une altitude située entre 3 200 m et 3 600 m, il existe également de véritables terrasses séparées par des talus de plusieurs mètres de haut. Les talus intermédiaires ont été abandonnés ou détruits et seuls sont conservés les talus qui servent de limites de propriété. Ceux-ci ne délimitent plus que des « pseudo-terrasses » excessivement larges et déclives, inadaptées aux conditions du milieu. À Ingapirca (Province de Cañar), ancienne zone d'influence incaïque, certains chemins principaux sont bordés d'énormes tas de cailloux bien empilés qui auraient pu, judicieusement entassés selon les courbes de niveau, constituer de magnifiques cordons de pierres (gabions).

En résumé, les pratiques et ouvrages conservatoires sont très rares et, lorsqu'ils existent, ils sont peu efficaces pour limiter les phénomènes d'érosion. C'est le cas, par exemple, sur les hautes terres densément cultivées des provinces de Chimborazo et de Cotopaxi, quelques essais récents de lutte antiérosive témoignent de la volonté de quelques paysans de s'opposer à la progression de l'érosion. Malheureusement, tels qu'ils

Depuis une quinzaine d'années, les paysans du minifundio s'ouvrent peu à peu à la mécanisation, notamment à l'emploi du tracteur. Le travail du sol est plus profond et le labour s'effectue systématiquement dans le sens de la plus grande pente, dans des conditions d'utilisation fréquemment dangereuses à cause des fortes déclivités. Pour faciliter l'utilisation du tracteur et le passage d'une parcelle à l'autre, le paysage bocager du minifundio disparaît. Pour toutes ces raisons, le cadre environnemental du minifundio est fragilisé et les sols sont plus exposés à l'érosion.



sont conçus, ces ouvrages présentent une efficacité assez réduite : il s'agit de petites rigoles d'écoulement des eaux de ruissellement (les *rayas*) et de barrières vives. Les rigoles sont en général trop peu profondes (une vingtaine de centimètres au plus) et leur pente est trop déclive (20 % à 25 %) pour assurer un transfert satisfaisant des eaux de ruissellement. Il en est de même pour les haies vives de *siges*¹ qui sont disposées d'une manière aléatoire face à la pente dominante (De Noni et al., 1994 b).

Pour sa part l'État, conscient du danger que représentait l'extension simultanée du minifundio et de l'érosion sur les terres de la Sierra, se lança, sans concertation aucune avec les paysans, dans un programme de lutte antiérosive dès le milieu des années soixante. Ce programme, essentiellement technique, fut mené par des forestiers qui mirent en œuvre un vaste plan de reforestation, quelque peu empirique et inspiré des travaux effectués antérieurement dans les montagnes françaises et celles du Maghreb. Ils intensifièrent les plantations d'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) qui avaient été introduites dans le pays plusieurs années auparavant parce que cet arbre présentait l'avantage d'une croissance rapide et d'une bonne adaptation aux sols de la région. Après une trentaine d'années, les surfaces couvertes par l'eucalyptus sont estimées à plus de 70 000 ha, mais le bilan pour la lutte antiérosive est décevant.

¹ Le *sigse* (*Cortaderia rudiocula*) ne pousse pas au-dessous de 2 000 m. C'est une graminée de hauteur moyenne, aux feuilles brillantes, à l'inflorescence bleu-jaunâtre en plumet, qui supporte la sécheresse et pourrait faire usage de fourrage.

Initiées par l'État, des mesures ponctuelles et inadaptées

En effet, l'eucalyptus n'arrête pas l'érosion concentrée, car son feuillage très diffus laisse passer les gouttes de pluie et ses besoins importants en eau empêchent la croissance d'une végétation secondaire utile pour protéger la surface du sol.

Au début des années soixante-dix, les forestiers tentèrent d'innover en introduisant des pins (*Pinus radiata*) et concentrèrent leurs efforts sur le reboisement des parties hautes des bassins versants. 12 000 ha furent ainsi couverts en pins, mais cette opération n'obtint pas les résultats escomptés. Deux raisons principales sont à prendre en compte : d'une part, les zones concernées étaient peu sensibles à l'érosion ; d'autre part, en étant reboisées, elles perdaient leurs usages traditionnels de terrains de parcours communautaires pour les différents minifundios.

Les causes des échecs

L'analyse précédente fait ressortir deux causes principales d'échec ; d'une part, l'isolement du minifundio et sa très faible participation à la lutte antiérosive ; d'autre part, l'absence de concertation entre les acteurs : les paysans, l'État, mais aussi les techniciens agronomes et les chercheurs. Les causes de ces dysfonctionnements ne sont pas spécifiques à la Sierra équatorienne, ceux-ci s'inscrivent dans un contexte général commun à



Labour au tracteur d'une parcelle située sur le flanc du volcan Mojanda, à 3 300 m d'altitude (région d'Otavalo). Le travail est réalisé dans le sens de la plus grande pente comme l'indiquent les traces de roues dans le sol. Ce type de préparation du sol aggrave l'érosion, notamment celle de l'eau de pluie qui profite des traces de roue dans le sens de la pente pour augmenter son énergie, inciser en profondeur et décaper la couche arable. En l'absence d'assistance technique, le paysan perpétue cette pratique.

de nombreux pays du Sud. Se pencher sur leurs origines nécessite un retour sur les grandes étapes de l'histoire de ces pays (ROOSE et DE NONI, 1998).

En effet, très rapidement, les premières civilisations sont confrontées aux problèmes de ruissellement et d'érosion, qui conduisent les paysans de l'époque à développer, de façon empirique, tout un ensemble de stratégies traditionnelles de gestion des eaux de surface et de la fertilité des terres. D'après Lowdermilk (*in* HUDSON, 1983 et 1992), les premiers vestiges archéologiques de lutte antiérosive dateraient de 7 000 ans. De nombreuses techniques antiérosives sont développées par les anciens : elles sont souvent très efficaces dans les conditions climatiques et surtout socio-économiques de leur époque, comme le démontrent les systèmes mis au point par les Incas et décrits chapitre 1. Par la suite, ces méthodes traditionnelles sont progressivement délaissées, parce qu'elles deviennent inadaptées face à la pression démographique qui se fait plus lourde. En parallèle, les progrès techniques se développent en milieu rural, sans que l'on prenne garde à la protection des ressources. Ainsi dans certaines régions, pour répondre à la demande alimentaire croissante, la mécanisation favorise l'extension des cultures sans tenir compte de la destruction de la couverture pédologique. Devant l'incapacité des méthodes traditionnelles à faire face à ces mutations démographiques et techniques, les États et les pouvoirs centraux prennent alors les choses en main en déléguant de gros moyens pour la mise en place de stratégies modernes d'équipement. Deux exemples pris dans des régions de montagne illustrent ce contexte.

Dans les Alpes françaises, la « Restauration des terrains de montagne » (RTM) est mise en place à partir de 1850. Le surpâturage des terrains communaux de montagne dégrade les sols et a pour conséquence d'augmenter la charge des torrents, avec les risques qui en dérivent pour les infrastructures. L'État recourt à l'intervention des forestiers qui lancent de vastes programmes de restauration des terrains en montagne, par la reforestation des hautes vallées et la correction des torrents. Les travaux techniques réalisés sont exemplaires dans la plupart des cas, mais les résultats sont plus contrastés d'un point de vue socio-économique (MURRA, 1991). Les éleveurs sont privés de leur droit d'usage sur les zones aménagées et manquent désormais de terres. Ils sont contraints de quitter leur région, dans un contexte où les tensions sont devenues assez vives avec les forestiers. Néanmoins, cette situation est atténuée par le développement naissant de l'industrie, à la recherche de main-d'œuvre.

Dans les montagnes d'Afrique du Nord, de 1940 à 1980, se développent des opérations de « Défense et Restauration des sols » (DRS). Berceau de civilisations anciennes prospères, ces pays sont affectés depuis longtemps par la dégradation des forêts, le surpâturage et l'extension des cultures sur des terres calcaires peu épaisses. Toutes les formes d'érosion s'y retrouvent et les oueds aux crues très brutales transportent des quantités de sédiments si importantes que la durée de vie des barrages y est particulièrement courte (trois à cinquante ans). Pour protéger et restaurer les sols, les forestiers sont une nouvelle fois sollicités et, sur la base des acquis obtenus depuis 1850, ils mettent en place des opérations de DRS qui associent, en fait, les techniques de RTM et celles utilisées par le Service de conservation des eaux et des sols qui s'est créé aux USA quelques années auparavant par Bennett. Ils s'emploient ainsi à reforester les hautes vallées, à corriger les ravines et les torrents et à aménager des banquettes sur les terres cultivées dégradées par l'érosion hydrique. Ces aménagements très onéreux, réclamant en outre la mise à disposition de terrains cultivables (5 % à 15 %, selon la pente), ne furent l'objet d'aucune concertation avec le paysannat local, comme dans le cas précédent (Le Coz, 1964; GRECO, 1966 ; LAQUINA, 1998).

Ces deux exemples pris dans des régions de montagne mettent en exergue le rôle de l'État qui s'appuie sur un certain savoir-faire technique qui prend le pas sur l'empirisme des anciens, mais ils soulignent aussi une déficience importante dans la prise en compte des contextes socio-économiques. Il en résulte de graves conflits sociaux : obligation d'exode pour les paysans touchés par la RTM et résistance quasi générale des paysans d'Afrique du Nord à l'encontre de la DRS, allant parfois jusqu'à la destruction des plantations arborées destinées à fixer les ouvrages, de crainte que l'État n'en profite pour prendre possession du capital foncier.

Pendant longtemps, les sociétés ont donc évolué dans ce contexte, soit en agissant empiriquement en réponse à des crises socio-économiques et démographiques, soit en subissant de manière plus ou moins passive les initiatives techniques pilotées par l'État. En règle générale, les résultats sont assez mitigés et peu durables. La participation de la recherche à la lutte antiérosive, qui n'intervient que récemment dans l'histoire de ces sociétés, laisse entrevoir de nouveaux espoirs et la possibilité d'atteindre une plus grande efficacité par une meilleure connaissance des facteurs physiques et humains du ruissellement et de l'érosion.

Si les premières parcelles de mesures de l'érosion et du ruissellement en milieu cultivé sont mises en place par Woulny en Allemagne en 1895 (HUDSON, 1963 et 1992), les recherches ne prennent un réel essor qu'en

1930 quand BENNETT (1939), le père de la « conservation des sols », met en place les toutes premières stations d'étude aux USA, en réponse à la grave crise érosive qui frappe le pays. Cette initiative sera reprise dans les années cinquante par F. FOURNIER (1960), dont l'influence marquera la recherche française outre-mer, notamment l'action de l'Orstom en Afrique de l'Ouest. Par la suite, de très nombreuses recherches ont été réalisées à différentes échelles : des études ponctuelles sur des placettes de 1 m² sous simulateur de pluie et sur des parcelles expérimentales de ruissellement de 50 à 1 000 m² de surface mais aussi sur de petits bassins versants de toutes tailles. Aujourd'hui, la tendance est plus à la modélisation et à l'analyse spatiale (systèmes d'information géographique) qu'à l'expérimentation et on recherche des indicateurs de risques de ruissellement, de stabilité des sols et de protection du couvert végétal et des paysages.

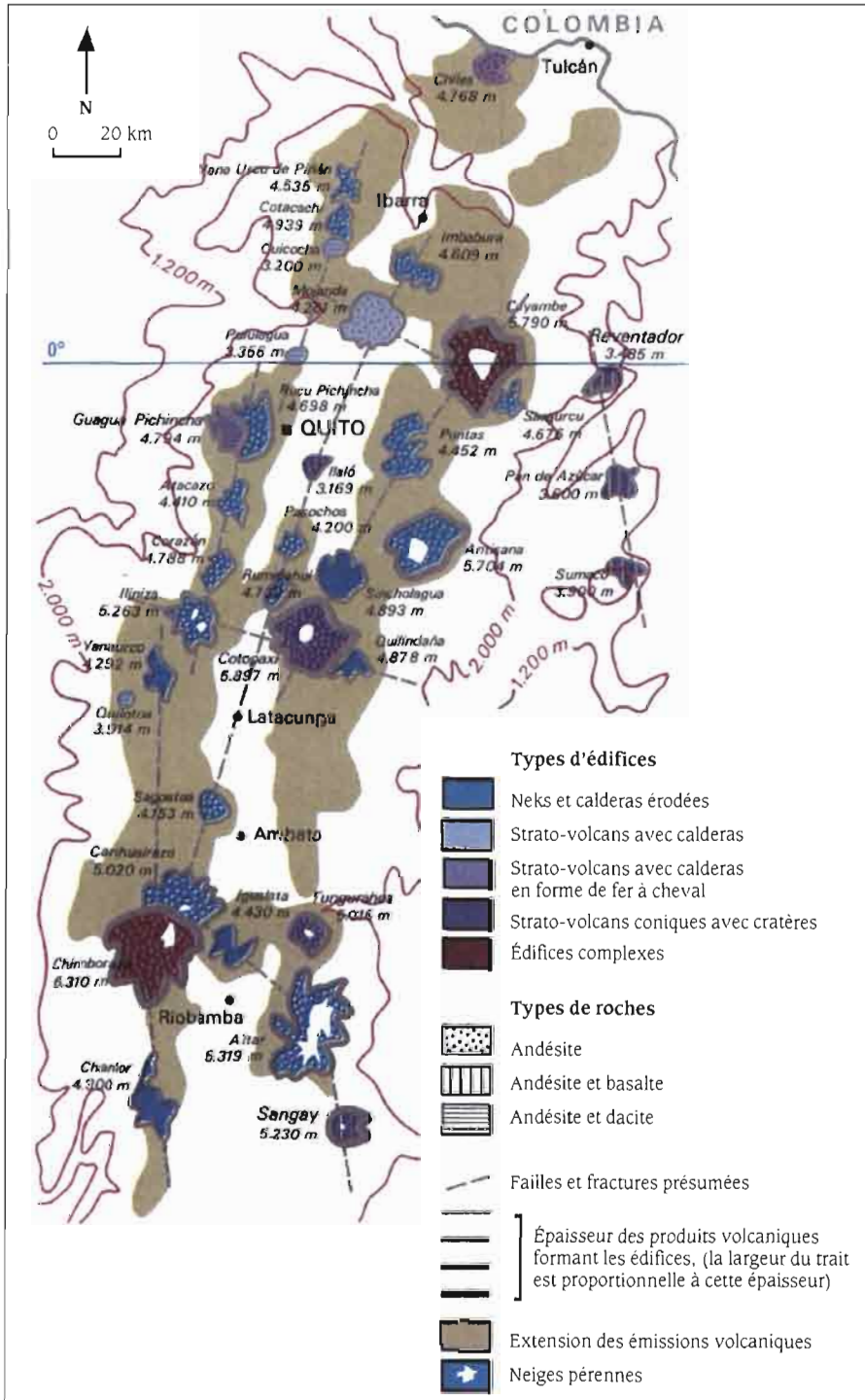
Aujourd'hui, le décalage qui existait entre la recherche et la lutte anti-érosive s'est comblé, néanmoins les espoirs fondés sur l'apport de la recherche sont loin de répondre aux attentes, comme en témoigne le résultat d'enquêtes réalisées par HUDSON (1991), qui souligne le nombre encore trop élevé de projets de lutte anti-érosive qui échouent. Au niveau international, les grands organismes, tels l'Unesco avec le projet MAB (Man and Biosphere) ou la FAO, se font l'écho de ce constat d'échec et soulignent l'impact insuffisant des recherches qui se sont trop souvent limitées à l'étude des processus de dégradation sans accompagner les programmes de conservation des sols ni favoriser le développement de moyens rentables de restauration de la productivité des sols. Émerge donc une nouvelle démarche axée sur l'homme qui, s'il peut être à la fois auteur et victime des méfaits de la dégradation des sols, possède suffisamment de ressources techniques et culturelles pour éviter une accentuation du phénomène. L'homme et l'environnement sont donc placés au centre des débats et la recherche d'un équilibre entre ces deux composantes, à la fois productif et viable et respectueux des ressources, s'impose comme l'un des fondements essentiels de cette démarche, applicable bien entendu à la lutte anti-érosive. Ainsi, la notion de développement durable est peu à peu élaborée et elle est introduite lors de la conférence des Nations unies de Rio de Janeiro en 1992, qui conclut : « Le progrès impulsé par l'homme ne doit pas être arrêté mais contrôlé afin qu'il puisse durer... »

La réussite d'une telle démarche implique l'intégration forte de la population dans des actions participatives aux différents niveaux du programme de lutte anti-érosive. Dans la Sierra équatorienne, les recherches sur l'érosion

et la lutte antiérosive étaient très ponctuelles et sans véritable engagement de la part des paysans. Notre programme, en proposant des liaisons concrètes entre recherche et application, en suscitant la participation effective du milieu paysan, et en prônant l'établissement d'une concertation entre paysans, techniciens, chercheurs et décideurs politiques, se situe clairement dans la démarche du développement durable. Pionnier en Équateur, il montre qu'il est possible de susciter et d'obtenir la participation des paysans du minifundio, dans une dynamique dont les différents aspects pratiques seront exposés et commentés dans la troisième partie de l'ouvrage.

Avant d'en arriver à cette phase cruciale du programme, il s'est avéré nécessaire de définir avec précision les types de processus en cours et leur organisation spatiale. Cela constitue l'objet du chapitre suivant.

CARTE 9 —
Le volcanisme quaternaire
dans la Sierra



Source : adaptation de la carte du volcanisme récent in atlas JA, 1982.

L'érosion accélérée des sols dans la Sierra

Évaluer l'impact de l'érosion accélérée des sols agricoles a constitué la première étape de la démarche suivie. L'objectif était :

- d'établir un inventaire des dynamiques et d'approfondir les mécanismes de déclenchement de l'érosion, afin de pouvoir envisager une lutte efficace ;
- de fournir au partenaire équatorien, en termes de stratégie, des informations sur la gravité des dynamiques, qui permettraient de choisir des projets pilotes pouvant servir d'exemples pour informer et former le paysannat local.

Pour réaliser l'évaluation qualitative et spatiale de l'érosion, un certain nombre de données étaient disponibles, notamment des cartes pédologiques et d'utilisation des sols élaborées entre 1974 et 1982 par l'Orstom et le ministère équatorien de l'Agriculture dans le cadre d'un premier accord de coopération. Ces cartes concernent :

- les sols de la Sierra (Colmet-Daage, Zebrowski), de la Costa (Winckell, Zebrowski) à l'échelle de 1 : 200 000, et de l'Oriente amazonien (Custode, Sourdat et De Noni) à l'échelle de 1 : 500 000 ;
- l'utilisation des terres de la Sierra (Gondard) et de la Costa (Huttel, Winckell et Zebrowski) à l'échelle de 1 : 200 000.

À partir de ces cartes et des travaux de terrain, il a été possible de reconnaître les unités dominantes de sol et d'occupation des paysages. Cela a permis de réaliser une étude relativement fine des principales

L'importance de l'érosion accélérée

dynamiques et d'observer les relations existant entre les mécanismes de déclenchement, les types d'usage du sol et les facteurs physiques du milieu. Dans cette phase préliminaire de l'étude, notre attention a d'abord porté sur l'ensemble du pays afin d'évaluer l'importance de l'érosion par grandes régions. Mais très rapidement, les sorties de terrain ont révélé l'importance de l'érosion accélérée dans la Sierra, ce qui a conduit à n'utiliser plus précisément que les cartes de cette région pour la réalisation de l'évaluation spatiale et quantitative.

La Sierra étant totalement couverte du nord au sud par des cartes pédologiques et d'utilisation des sols, toutes les régions agricoles ont ainsi pu être prospectées avec précision. À l'échelle de 1 : 200 000, la Sierra est couverte par neuf cartes dont le découpage est imposé par l'Institut géographique militaire d'Équateur. Les cartes de Tulcan, Ibarra, Quito, Latacunga-Ambato, Riobamba couvrent le domaine des pyroclastites dans la Sierra nord et centre ; les cartes de Cuenca, Loja, Macara, Zamora couvrent la Sierra méridionale.

¹ On a distingué les manifestations dues au ruissellement concentré de la manière suivante :
celles qui sont effaçables par les techniques culturales ;
les griffures (moins de 5 cm de large et autant de profondeur)
et les rigoles (10 à 15 cm de large et jusqu'à 25 cm de profondeur) ;
celles qui ne sont pas effaçables par les techniques culturales :
les ravines (25 à 50 cm de large et autant de profondeur)
et les ravins qui sont d'échelle métrique ou plurimétrique.

Les prospections de terrain ont établi que l'érosion concentrée sous forme de rigoles et de ravines¹ dans les régions aménagées était la dynamique majeure qui provoquait les pertes en terre les plus importantes. À titre d'exemple, on a reproduit, parmi les cartes à 1 : 200 000 mentionnées antérieurement, une portion de la carte en couleurs de l'utilisation des sols de la région d'Ibarra dans la Sierra nord (cf. carte 7, hors texte) dressée par GONDARD *et al.* (1975-1983). Les couleurs affectées aux différentes unités représentent les productions agricoles, la végétation « naturelle » et les zones qui présentent des problèmes d'érosion : zones avec des sols peu profonds pourvus d'une végétation discontinue et affectés par un réseau de ravines moyennement dense et zones très dégradées. Ces dernières sont si fortement affectées par l'érosion qu'il n'a pas été possible de distinguer les secteurs très ravinés et les secteurs où le décapage généralisé laisse affleurer les couches indurées de cangahua, très étendues dans la Sierra nord et centre.

Dans la Sierra méridionale, sur un substrat non volcanique, l'importance du ruissellement concentré et de l'érosion qui y est associée est tout aussi forte dans les régions aménagées. La portion d'une autre carte dressée également par GONDARD *et al.* (1975-1983) dans la région de Loja (cf. carte 8, hors texte), dans une zone où affleurent les roches du socle sur les points hauts et les dépôts détritiques dans la vallée du Léon, fait ressortir la présence de productions agricoles, de zones de végétation « naturelle », où dominent des arbustes de type matorral développés sur des sols ferrallitiques et de zones présentant des

problèmes d'érosion : secteurs avec un chevelu dense de rigoles et de ravines et des sols peu épais et secteurs très ravinés présentant localement des bad-lands.

De façon plus précise, les prospections de terrain ont montré que l'action du ruissellement concentré est associée dans la plupart des cas à d'autres dynamiques selon un système de relais : soit un relais spatial, dans le cas du ruissellement diffus et des mouvements de masse, soit un relais temporel dans le cas de l'érosion éolienne. En définitive, trois dynamiques principales ont été retenues :

- le ruissellement concentré relayé spatialement par le ruissellement diffus² ;
- les mouvements de masse relayés spatialement par le ruissellement concentré ;
- le ruissellement concentré relayé dans le temps, à l'échelle de l'année, par l'érosion éolienne.

Au plan spatial, l'érosion est présente partout. Cependant, ses manifestations semblent plus marquées et généralisées dans les parties nord et centre de la Sierra, entre Tulcan et Riobamba, où le volcanisme quaternaire s'est montré très actif (cf. carte 9, hors texte). C'est d'ailleurs dans cette partie de la Sierra appelée « l'avenue des volcans » que l'on trouve la cangahua, qui est un bon indicateur de l'intensité de l'érosion.

² Le système de relais diffère selon la nature du substrat. Dans la Sierra volcanique, le ruissellement diffus est essentiellement actif sur la cangahua lorsque celle-ci affleure largement, quel que soit l'endroit du versant. Sur les roches du socle et sur les dépôts détritiques, le ruissellement diffus intervient au départ de la dynamique sur les sommets de versants (cf. fig. 6).

L'association « montagne + forte pression humaine sur la terre » est à l'origine de l'érosion chronique qui affecte les paysages de la Sierra. L'érosion anthropique semble suivre l'avancée des fronts de défrichements du minifundio. Ses manifestations sont d'autant plus actives qu'elle agit sur un milieu non aménagé. Les particules fines du sol, notamment la matière organique dont dépend sa fertilité, sont les plus exposées. À mesure qu'elles sont érodées, le sol s'éclaircit avec plus ou moins d'intensité, comme le montre la vue panoramique de ce versant prise entre Ambato et Riobamba, à 3 400 m d'altitude.



Les principales dynamiques de l'érosion des sols dans la Sierra

Le ruissellement concentré relayé par le ruissellement diffus

Dans la dépression volcanique

Le ruissellement concentré relayé par le ruissellement diffus est le type de dynamique qui domine dans toute la Sierra. Dans la Sierra volcanique, cette dynamique est particulièrement active dans les zones aménagées sur des versants constitués essentiellement de dépôts pyroclastiques et situés dans la dépression interandine (carte 4). Ces dépôts, dont l'épaisseur maximale est de l'ordre de 1 mètre à 1,50 mètre, sont composés de sables fins et grossiers, en alternance avec des pierres ponceuses. Ils portent des andosols vitriques, d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, meubles et pulvérulents, faiblement agrégés et pauvres en matière organique (< 2 %).

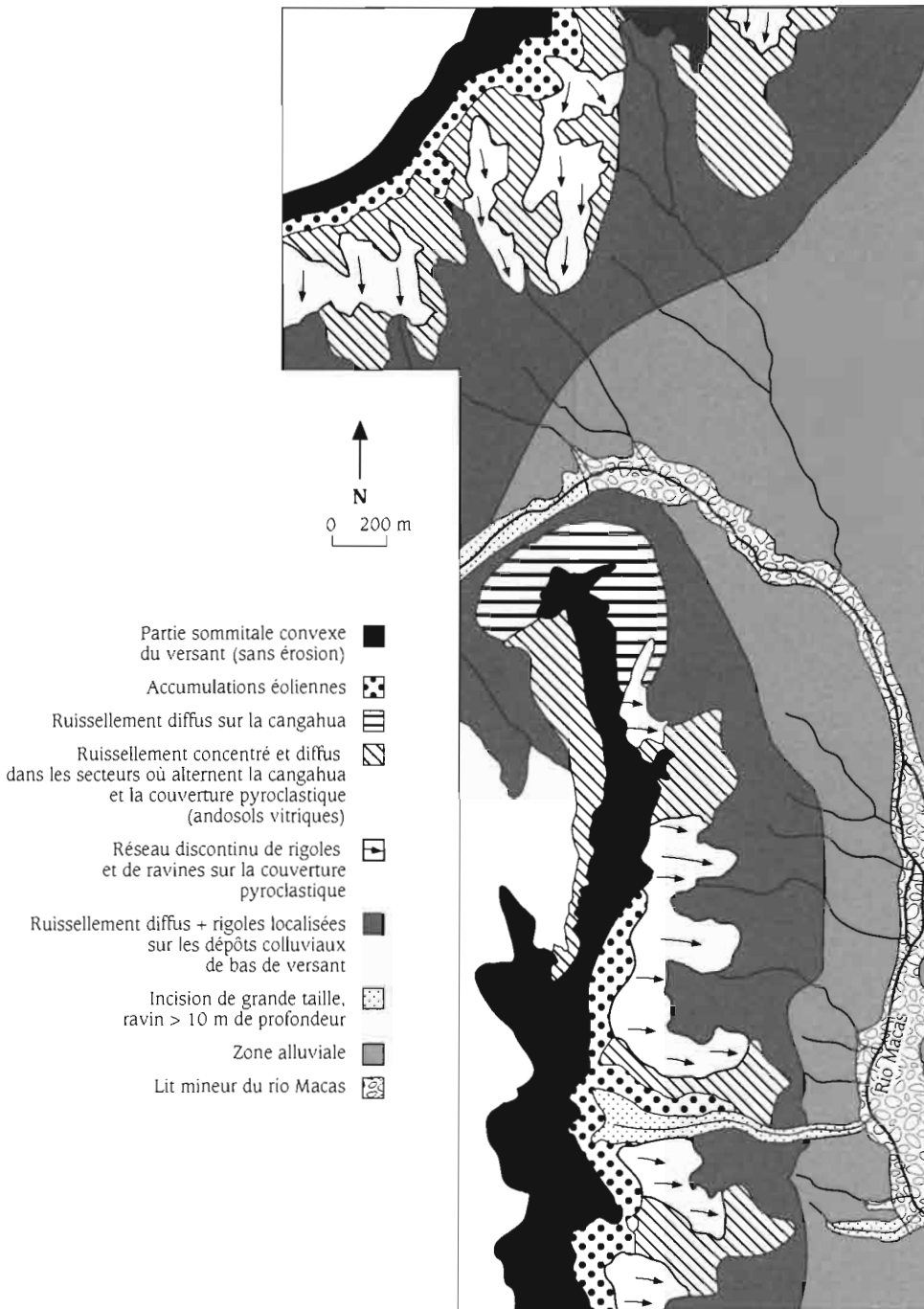
Sous ces dépôts se trouve une formation volcanique indurée, la cangahua, dont la présence a été signalée sur la carte d'utilisation des terres d'Ibarra (carte 7). L'épaisseur de la cangahua peut être localement importante et dépasser 10 mètres. Au-dessous, on retrouve une superposition de lits pyroclastiques, essentiellement sableux et ponceux.

Les zones aménagées sont cultivées en maïs, qui est la production principale du minifundio entre 2 000 et 3 000 mètres (cf. carte 6).

Un versant convexo-concave situé à une quinzaine de kilomètres au NW de la ville de Latacunga dans le grand bassin de Pastaza est exemplaire de ce type de dynamique dominant dans l'étage compris entre 2 000 et 3 000 mètres d'altitude (carte 10, échelle de 1 : 20 000). Dans sa partie basse et moyenne, le versant est occupé par de petites parcelles de maïs ; puis progressivement vers le haut par des parcelles d'orge et de pomme de terre. Au pied du versant, dans le bassin, on trouve des pâturages irrigués. Dans la partie rectiligne du versant, les pentes sont comprises entre 30 % et 40 %, elles s'abaissent progressivement et forment une concavité basale au contact avec la petite vallée du rio Macas (pente de l'ordre de 2 % à 10 %).

Sur ce versant, dès que la pente atteint 2 % à 5 % d'inclinaison, le ruissellement se concentre rapidement dans les pyroclastites meubles. Le chevelu formé par les rigoles et les ravines est relativement lâche et d'échelle centimétrique. Cette impression d'ensemble est due au tracé irrégulier et discontinu des incisions dont les bords sont instables et s'écroulent facilement à mesure que le ruissellement se concentre dans les pyroclastites. En l'absence de fond topographique, des flèches, qui indiquent le sens de la plus grande pente, ont été dessinées dans les secteurs affectés par le ruissellement (carte 10).

CARTE 10 — Cartographie de l'érosion concentrée relayée par le ruissellement diffus sur les andosols vitriques et la cangahua du bassin de Latacunga

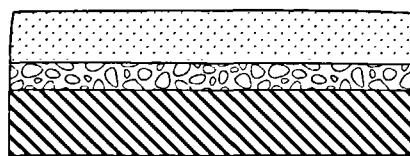


Les formes d'érosion, notamment les ravines, deviennent pérennes lorsque l'érosion est parvenue jusqu'à la cangahua, en général dans les parties du versant où la topographie favorise la confluence des filets




FIG. 3 —
Le ruissellement concentré
(bassin de Latacunga)

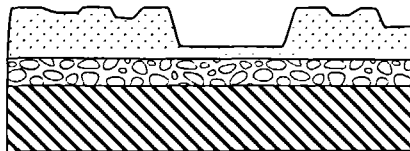


Dessin schématique d'un versant représentatif du bassin de Latacunga où le ruissellement concentré (flèches noires) décape les andosols vitriques et fait affleurer la cangahua (en gris foncé).

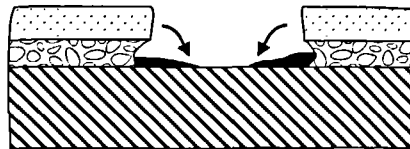


Situation de départ :
andosol vitrique

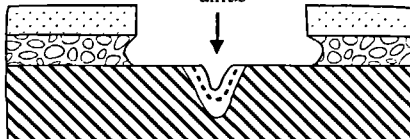
-  Sables
-  Ponces
-  Cangahua



La ravine
en forme de « U »,
progressé sans difficulté
sur l'andosol,
meuble et pulvérulent,
jusqu'à atteindre
la cangahua.



Relais du ruissellement
diffus



La progression
de la ravine est ralentie
par la cangahua indurée.
Le ruissellement diffus
devient alors dominant.

d'eau. Dans la cangahua, la vitesse de creusement par l'érosion est considérablement ralentie du fait de la grande résistance de ce matériau et les incisions évoluent sous l'effet des micro-éboulements des berges taillées dans les pyroclastites. Cela aboutit par recul des versants à donner des ravines et des ravins en forme de « U », d'échelle métrique. Par recoupements successifs des versants de plusieurs ravines, le versant évolue vers un décapage généralisé des dépôts pyroclastiques qui disparaissent au profit de la cangahua. Les coupes de la figure 3 montrent l'évolution du ruissellement concentré par étapes successives jusqu'à atteindre la cangahua. Dans cette formation, les entailles sont plutôt rares et très localisées, elles présentent en général un profil en forme de « V » et se situent là où l'énergie du ruissellement est suffisamment forte pour inciser cette formation, sur des pentes supérieures à 40 %. En règle générale, le ruissellement diffus est la dynamique dominante sur la cangahua. Son impact sur le façonnement du versant reste toutefois modeste et consiste essentiellement en une action de « balayage » généralisé qui contribue à lisser et nettoyer les surfaces de cangahua.

L'érosion par ruissellement concentré de l'eau de pluie sur le sol est le processus le plus généralisé et le plus actif. Selon le type de substrat et l'intensité de l'érosion, se forment des griffes, des rigoles ou des ravines, au profil transversal en « U » ou en « V », qui incisent la surface du sol. Après plusieurs années et sans aménagement, ces formes peuvent évoluer en ravins ou *quebradas*, et en « bad-lands ». Sur cette photo prise dans la vallée de Cebadas (Province de Chimborazo) à 3 250 m d'altitude, la cendre noire, récemment travaillée et prête à recevoir le semis d'orge, est parcourue sur toute la surface de la parcelle par un lacis de griffes et de rigoles d'érosion.



Dans la Sierra méridionale

Dans la Sierra méridionale, sur un substrat très différent de celui de la Sierra pyroclastique (cartes 3 et 4), le ruissellement concentré et le ruissellement diffus sont également actifs. Quels que soient les substrats présents dans cette partie de la Sierra, dépôts sédimentaires dans la dépression et roches du socle sur les cordillères, les versants présentent des sols érodés dans les zones aménagées.

Les zones les plus érodées sont situées dans les petits bassins de la dépression andine. Les versants sont modelés dans des dépôts détritiques très épais (argiles, sables, conglomérats), contemporains de l'érection des Andes au tertiaire (FAUCHER et SAVOYAT, 1973). Localement, ces dépôts forment des reliefs monoclinaux où alternent des bancs de grès, des argilites métamorphisées et des couches d'argile et de sable. Les sols sont peu épais dans l'ensemble : ce sont soit des sols argilo-caillouteux ou sablo-caillouteux, soit des sols argilo-sableux d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur au plus (sols molliques). Ils sont fortement ravinés par un chevelu dense de rigoles, de ravines et de petits ravins.

En général, les versants présentent des profils convexo-concaves et s'érodent selon un système de relais différent de celui qui affecte les pyroclastites, de la façon suivante (cf. fig. 6) : action du ruissellement diffus sur le sommet convexe des versants (5 % à 15 % de pente ; action de l'érosion concentrée qui relaie le ruissellement diffus dans la partie rectiligne du versant (20 % à 40% de pente) et qui incise les sols par un chevelu dense de rigoles et de ravines ; évolution de l'érosion concentrée vers le ravinement généralisé en « bad-lands » à la base concave du versant (pente de 10 % à 20 %).

Dans la plupart des cas, la présence d'un matériau détritique, relativement homogène et épais, favorise le creusement d'incisions en « V ». Il existe, cependant, des situations locales où les incisions évoluent vers un profil en « U ». C'est le cas, par exemple, sur les reliefs monoclinaux où le matériau est plus hétérogène. L'érosion progresse plus rapidement dans les couches d'argiles et de sables que sur les couches dures de grès et d'argilites. Lorsque les ravines atteignent les couches dures, le creusement vertical est ralenti et elles évoluent latéralement par l'érosion des couches les plus tendres. L'élargissement progressif des ravines aboutit au décapage des couches dures selon une dynamique similaire à celle décrite dans le cas de la cangahua.

Dans les cordillères

Au-delà de 3 200 m d'altitude, dans le domaine des cordillères situé au-dessus de la dépression pyroclastique, l'érosion concentrée paraît moins importante bien que les versants soient plus pentus et plus arrosés. La

raison principale en est que l'occupation humaine est plus dispersée que dans la dépression. Les sols sont des andosols hydratés bien structurés, de couleur noire, développés sur 1 m d'épaisseur environ et bénéficiant d'une bonne couverture végétale : paramo et matorral sur les hautes terres des cordillères, et forêts denses sur les versants exposés aux influences pacifiques et amazoniennes. À cette altitude, la cangahua n'existe plus.

L'érosion accélérée ne concerne que les zones aménagées situées le long et à proximité des axes de communications qui traversent les cordillères. Pour l'instant, la dynamique ne dépasse pas le stade des griffures et des rigoles, dont une partie est effacée à l'occasion des labours (pentes de 20 % à 70 %). Toutefois, une extension des défrichements peut laisser craindre une accélération de la dynamique dans les zones aménagées, avec des risques de reprise d'érosion dans les zones situées plus à l'aval.

Sur les cordillères du Sud comme pour celles de la Sierra du Nord, les empreintes de l'érosion concentrée sont plus lâches que dans la dépression interandine et traduisent l'état de dispersion des zones aménagées ainsi que la présence d'une végétation « naturelle » dense. Les versants sont taillés dans les roches du socle : roches volcaniques basiques très anciennes (dolérites, basaltes, diabases entre autres), d'âge crétacé, sur la cordillère occidentale ; roches métamorphiques (gneiss, micaschistes), d'âge paléozoïque, liées au socle guyano-brésilien, sur la cordillère orientale.

Sur les cordillères, les précipitations (plus de 1 000 mm par an) entretiennent une humidité ambiante constante au cours de l'année qui favorise l'altération des roches du socles et le développement de sols ferrallitiques et fersiallitiques. Dans les zones aménagées sur ces sols, le chevelu de l'érosion concentrée est plus ou moins dense sur les pentes comprises entre 20 % et 40 %. Les incisions présentent en général une forme en « V » : rigoles et ravines d'échelle centimétrique et quelques ravins d'ordre métrique.

L'érosion concentrée est active également lorsqu'elle est associée à des mouvements de masse. Dans ce cas, l'érosion concentrée joue le rôle de relais spatial par rapport aux mouvements de masse qui sont à l'origine de la dynamique.

Ce type de dynamique est plus localisé que celle précédemment envisagée. Son existence dans la Sierra dépend :

- de la nature du substrat et des sols qui en dérivent. La présence d'argile, qui est un matériau sensible à la présence d'un excès d'eau, est un élément déterminant ;

L'érosion concentrée associée à des mouvements de masse

– de l'utilisation des sols dans les zones aménagées. Dans la Sierra, ce sont les zones de pâturage, où le passage des animaux provoque sur le sol des surcharges superficielles accompagnées de petits effets de cisaillements, qui sont surtout affectées par cette dynamique.

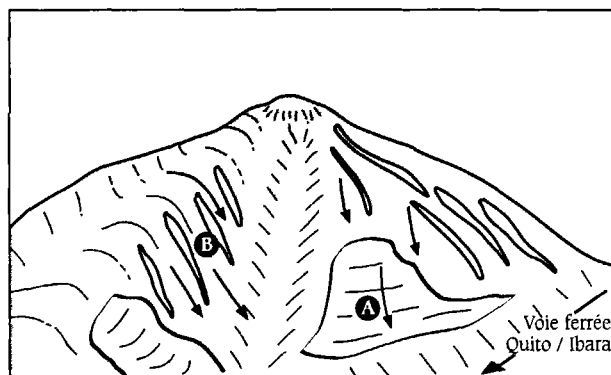
Dans la Sierra volcanique

Dans la Sierra volcanique, les versants affectés par cette dynamique sont couverts par une cendre volcanique très noire, riche en limons et sables fins, et sont situés essentiellement dans la dépression interandine. Sur cette cendre se sont développés des sols qui se caractérisent par la présence, à la base du profil, d'un horizon très argileux (épaisseur comprise entre 0,20 et 0,80 m) riche en montmorillonites (andosols molliques, carte 4). Comme dans le cas des pyroclastites sablo-ponceuses, ces cendres recouvrent la cangahua.

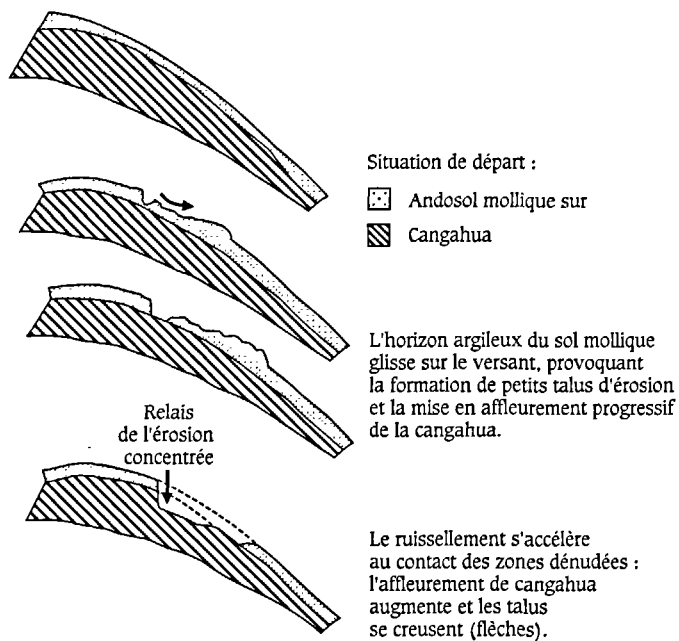


Le ruissellement associé à des mouvements de masse est un processus ponctuellement actif sur les sols qui présentent un horizon argileux situé en profondeur sur une couche imperméable qui correspond dans la plupart des cas à la « cangahua ». L'horizon argileux, une fois saturé d'eau, se déplace en masse sur la cangahua qui constitue un excellent plan de glissement. Sur cette photo prise dans le bassin de Quito à 3 000-3 200 m d'altitude, on observe au premier plan la cangahua et, au second plan, le talus d'érosion où s'est conservée une partie du sol et de la cendre de surface.

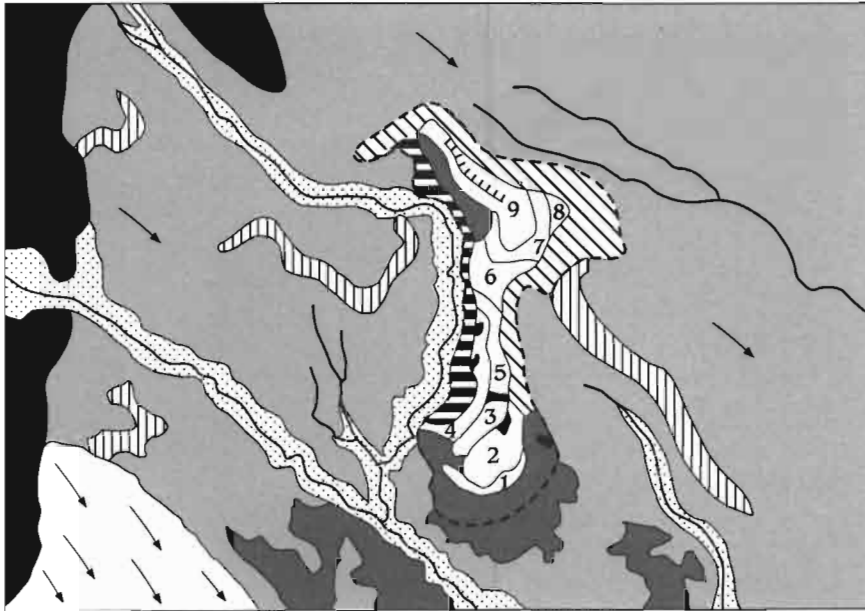
FIG. 4 —
Le ruissellement associé
à des mouvements de masse
(bassin de Quito)



Dessin schématique d'un versant représentatif du bassin de Quito où l'érosion décape les andosols molliques et fait affleurer la cangahua **A**. Les formes d'érosion, d'allure linéaire au départ **B**, évoluent vers des formes recoupant plusieurs ravines. La dynamique évolue dans le sens de la plus grande pente, ici 25 à 30 % (flèches).



L'exemple représentatif de ce type de dynamique est situé à proximité de la ville de Quito et correspond à un petit interfluve de forme allongée. Les pentes des versants sont de l'ordre de 10 % à 15% au sommet et au pied des versants et comprises entre 20 % et 40 % dans la partie médiane. Sur la carte 11, l'interfluve est délimité par un trait noir épais



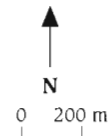
CARTE 11 —
Cartographie
de l'érosion concentrée
relayée par de petits
mouvements de masse
dans le bassin de Quito

Sur l'interfluve

- Limite topographique de l'interfluve
- ② Surface de l'interfluve divisée en 9 niveaux séparés par des talus d'érosion (0,50 m à 1 m de hauteur)
- Petits talus d'érosion (0,2 - 0,3 m de hauteur) taillés dans le sol mollique
- ▨ Modelés de « terrassettes » décimétriques provoquées par le piétinement des animaux (versant oriental)
- ▩ Réseau lâche de rigoles et ravines sur colluvions

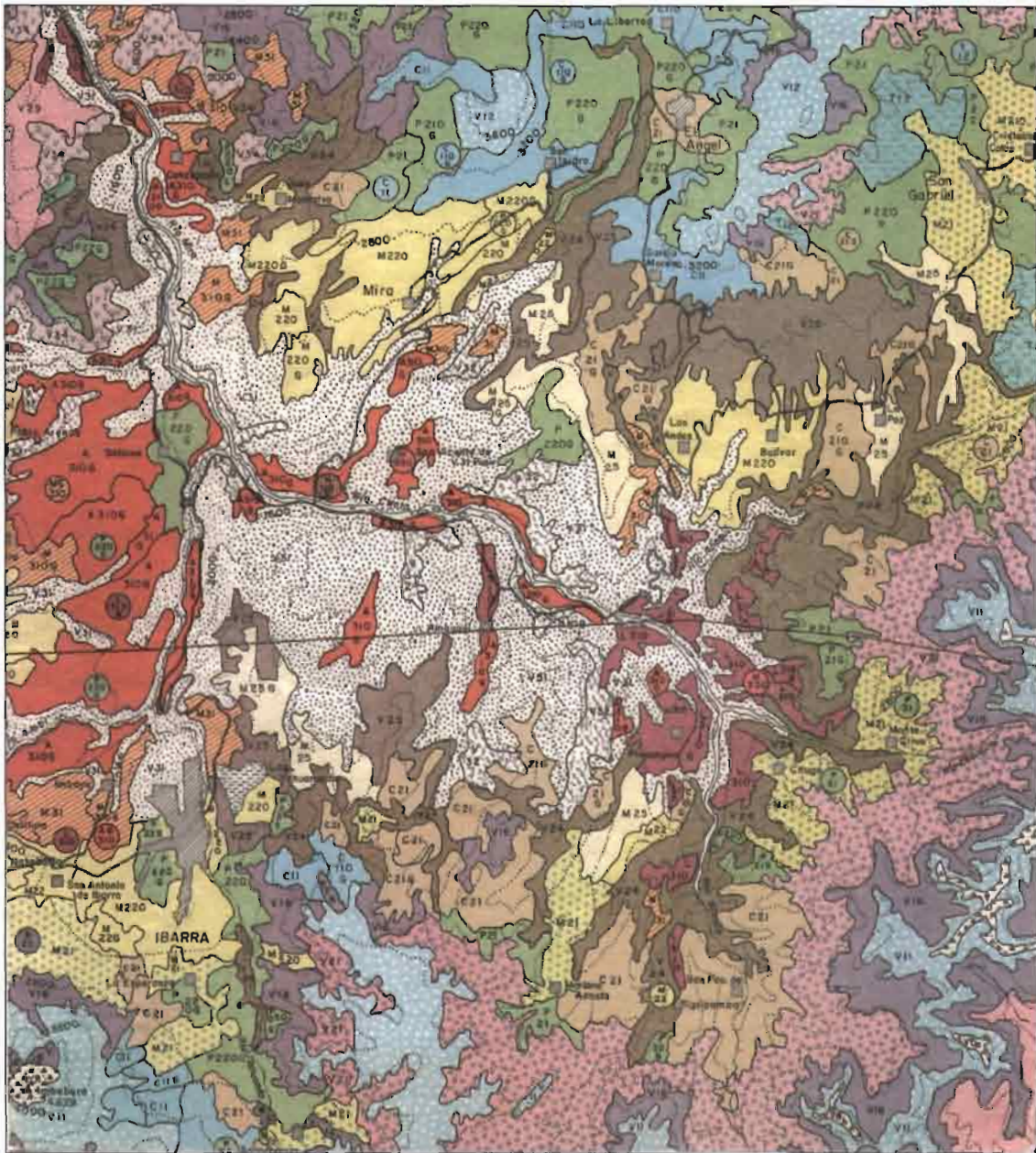
Hors de l'interfluve

- Ruissellement diffus sur la cangahua affleurante
- ▨ Grands talus d'érosion, hauteur > 1 m
- ▨ Zone aménagée : rigoles dans les champs et « terrassettes » décimétriques dans les pâturages
- ▨ Réseau dense de rigoles dans les parcelles de maïs
- ▨ Principales incisions, ravins > 10 m de profondeur



discontinu. Il est situé sur le grand versant qui sépare le site de Quito, à 2 800 mètres d'altitude, et le fond de la dépression interandine qui se trouve à 2 500 mètres d'altitude. Il se distingue du reste du versant par la présence d'une ravine profonde qui longe son versant occidental. Les sols sont des andosols molliques d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur ; au-delà de cette profondeur se trouve la cangahua. Ils sont pâturés toute l'année par des troupeaux de moutons et de chèvres.

Cet exemple est révélateur du fait que les sols sont soumis à une dynamique érosive particulièrement active. Les principales marques dans le paysage sont la présence :



Source : extrait de la carte originale au 1 : 200000, Pronareg-Orstom, 1975-1983.

CARTE 7 —
Carte d'utilisation
des sols d'ibarra

Agriculture

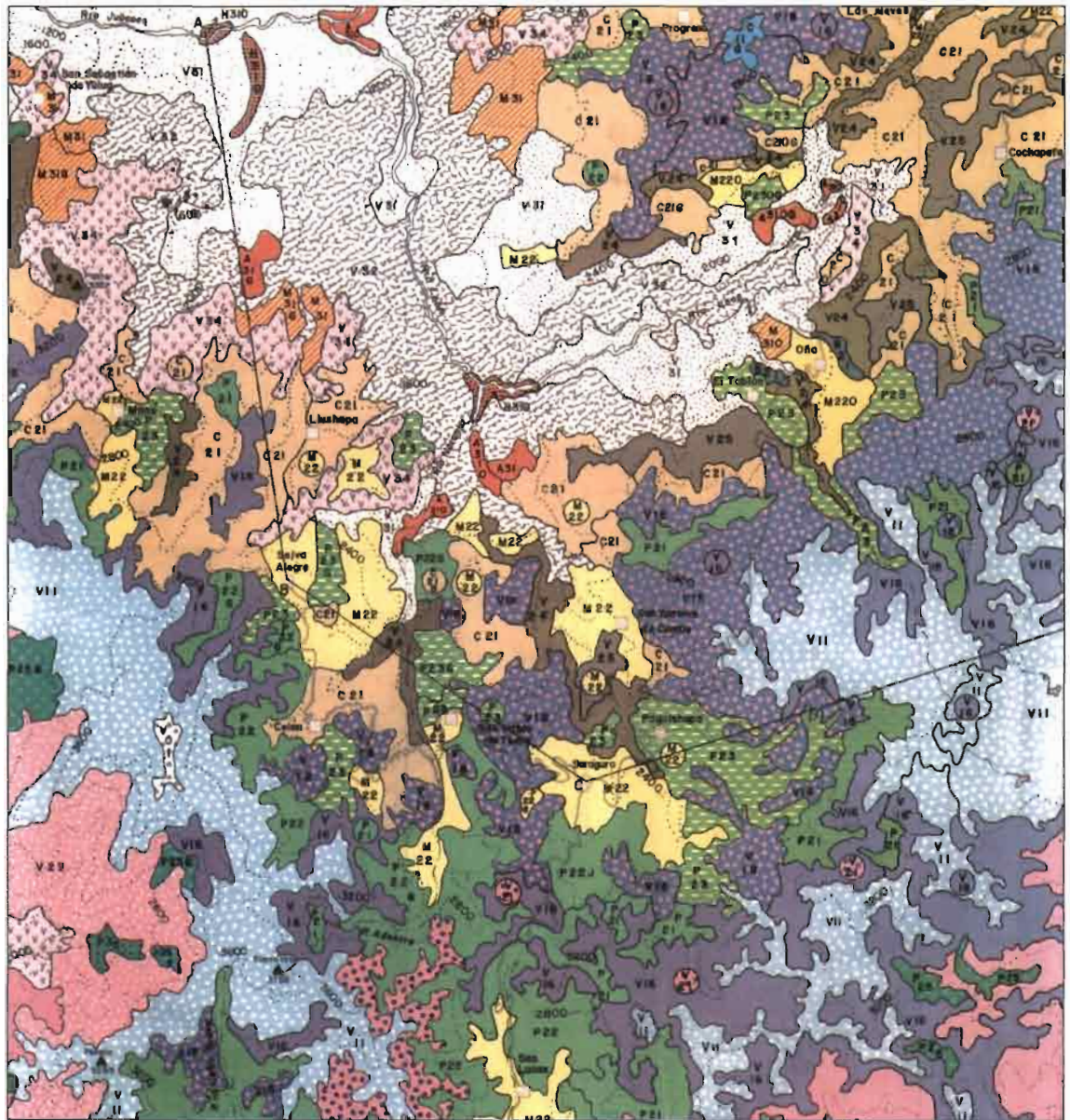
- Maïs
- Pâturage
- Horticulture

Végétation

- Paramo + matorral
- Formation arborée

Érosion

- Sols peu profonds, mal couverts + rigoles
- Zones très dégradées



Source : extrait de la carte originale au 1 : 200000, Pronareg-Orstom, 1975-1983.

Agriculture

- Maïs
- Céréales
- Canne à sucre
- Pâturage

Végétation

- Paramo
- Matorral
- Formation arborée humide (versants externes)

Érosion

- Sols peu profonds, réseau dense de rigoles + ravines
- Zones très dégradées + bad lands

CARTE 8 —
Carte d'utilisation
des sols de Loja

- de petits talus d'érosion, d'une quarantaine de centimètres de hauteur, qui entaillent les andosols molliques, et de talus d'érosion plus hauts, atteignant jusqu'à 1 mètre de hauteur, qui tranchent les andosols molliques et la cangahua sur le sommet de l'interfluve et sur son versant méridional. Des talus plus hauts, de hauteur supérieure à 1 mètre, ont été observés hors de l'interfluve sur le versant principal ;
- d'un chevelu assez dense de rigoles sur les dépôts colluvio-alluviaux où la végétation est clairsemée (versant occidental de l'interfluve) ainsi que dans les parcelles de maïs qui entourent l'interfluve (les flèches noires indiquent le sens de la plus grande pente) ;
- d'un modelé de « terrassettes » décimétriques, provoquées par le piétinement des animaux, sur le versant nord et est de l'interfluve ainsi que dans les pâturages situés hors de l'interfluve ;
- de petites zones localisées sur le sommet de l'interfluve, où la cangahua est décapée, et une zone beaucoup plus grande située sur le versant principal, à l'amont de l'interfluve.

Il semble bien que lors de précipitations abondantes la saturation en eau des andosols molliques, en particulier de leurs horizons argileux, préside au déclenchement de la dynamique (fig. 4). Partant de là, toute pression exercée par une action anthropique (dans la plupart des cas, le piétinement des animaux), accélère le glissement de l'horizon argileux sur la cangahua. La surface topographique laisse apparaître, sous l'effet des cisaillements superficiels, la présence de petits glissements en paquets séparés par des micro-talus d'échelle décimétrique. À partir de ces talus, l'érosion concentrée prend le relais. L'eau se concentre en petites cascades à la base des talus qui progressent en profondeur jusqu'à atteindre la cangahua.

L'érosion concentrée est active également dans les zones situées entre les talus où les andosols molliques présentent un profil tronqué du fait du glissement de l'horizon argileux. Il ne reste plus qu'un horizon sableux fin et limoneux, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, très sensible à l'érosion concentrée dès que la pente atteint 10 % d'inclinaison et que la végétation est clairsemée. L'érosion de cet horizon aboutit au décapage de la cangahua, sur des surfaces d'échelle hectométrique.

Considérant que les mouvements de masse envisagés dans ce cas provoquent localement le déplacement de l'horizon argileux du sol, transformé en une masse boueuse, sur un substrat stable de cangahua, on peut admettre que ceux-ci se rattachent plus à une dynamique de type « solifluxion » qu'à des mouvements provoqués par des glissements de terrain. Cela étant, c'est le relais pris par l'érosion concentrée qui est déterminant pour faire évoluer le versant vers un décapage généralisé

de la cangahua. Une fois ce stade d'évolution atteint, la dynamique de creusement est ralentie dans la cangahua et seule est vraiment active sur ce substrat induré l'action de « balayage » due au ruissellement diffus.

*Dans la Sierra
méridionale*

Dans la partie méridionale de la Sierra, ce type de dynamique a été observé également dans le bassin de Cuenca et plus localement dans la région de Loja, sur les versants des cordillères en cours d'aménagement.

Dans le bassin de Cuenca, où la pluviométrie est plus élevée que dans les autres bassins de la Sierra (800-1 300 mm), les versants affectés forment un paysage de collines convexes dont les pentes sont comprises entre 15 % et 40 %. L'activité principale sur ces collines est l'élevage de bovins pour la production de lait et de viande.

Les versants sont constitués de dépôts détritiques sur les 2 ou 3 premiers mètres ; existe ensuite un mélange de sable et d'argile auquel succède en profondeur une succession de lits franchement argileux. Les sols sablo-argileux, moyennement épais (0,40 à 0,50 m), présentent des caractères vertiques.

La surface topographique des versants est entaillée par des niches de décollement en arc de cercle qui constituent autant de petits talus (de 0,40 à 1 mètre de hauteur) tranchant la couche superficielle de sable et d'argile. Ce type de forme témoigne de l'action d'une dynamique de foirage au niveau des lits d'argile profonds, provoquant la mise en porte-à-faux et le cisaillement de la couche superficielle. Une fois le substrat mis à nu, l'érosion concentrée prend le relais. Les flancs des niches sont ravinés par un réseau dense de rigoles et de petites ravines. Dans les cas où l'évolution est plus avancée, l'érosion aboutit à un ravinement généralisé en bad-lands, d'échelle hectométrique.

Sur les versants des cordillères, des coups de cuillère, d'échelle métrique, apparaissent localement. La dynamique affecte les altérites argileuses et décape les roches du socle. Ces formes ont été localisées dans les zones aménagées et n'ont jamais été observées sous la forêt qui couvre les versants. Sur les altérites mises à nu par les coups de cuillère, l'érosion ravinante prend le relais jusqu'à atteindre la roche saine.

**L'association de
l'érosion concentrée et
de l'érosion éolienne**

Le troisième et dernier type de dynamique représentative correspond à l'association de l'érosion concentrée et de l'érosion éolienne. Par rapport aux deux dynamiques précédentes, elle se manifeste plus ponctuellement et se distingue par :

- la nature du substrat qu'elle affecte. Seule la Sierra volcanique est concernée par son action dans les zones où existent des sols sableux fins ;

– le rôle exercé par l'érosion éolienne, qui agit en tant que relais temporel imposé par le climat dans des zones où le vent trouve des conditions favorables.

Les zones qui sont touchées par cette dynamique sont plus restreintes que celles affectées par l'érosion hydrique et sont localisées dans le grand bassin de Guayllabamba, à proximité de Quito, et dans celui de Pastaza, à proximité de Riobamba.

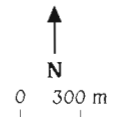
La zone étudiée est située dans le bassin de Quito sur le versant oriental du volcan Mojanda (carte 12). Elle est caractérisée par une faible pluviométrie (moins de 600 mm de pluie par an) et soumise, durant deux mois consécutifs, aux effets desséchants du « foehn ». Le versant étudié correspond



Le ruissellement est associé à l'érosion éolienne dans les zones où les précipitations sont inférieures à 600 mm par an et où les sols sont de texture sableuse. Durant les mois d'été, de juin à début septembre, l'action du vent devient dominante. Celui-ci sculpte alors les horizons de surface du sol en formant de petits sillons et monticules appelés « yardangs ». Dans les zones très exposées, le vent crée de véritables champs de yardangs comme le montre cette photo prise entre Riobamba et Guamote, à 3 200 m d'altitude.



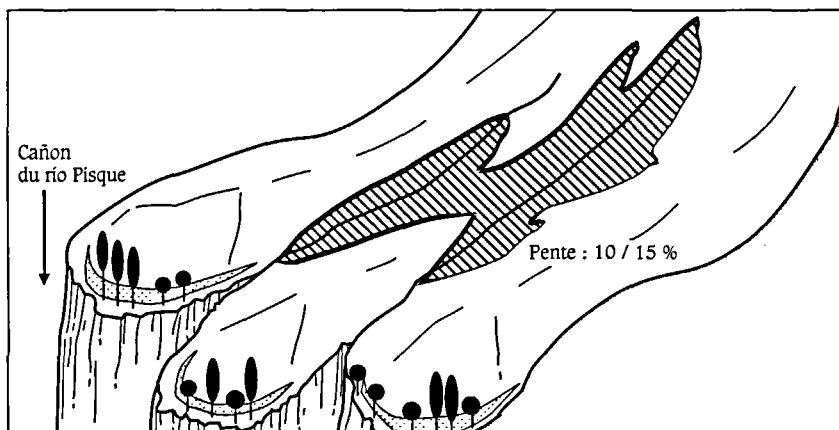
- ▣ Accumulations sableuses de 0,4 à 1 m d'épaisseur (« rebdou s » et « nebkas »)
- Réseau dense de rigoles et de petites ravines sur andosols vitriques (pente de 10 à 15 %)
- ▨ Ruissellement diffus sur la cangahua affleurante
- Principales incisions, ravins supérieurs à 10 m de profondeur
- Limite entre le versant et le canyon du río Pisque



Nota : le vent est dû ici à un phénomène de foehn de direction nord-est.

CARTE 12 —

Cartographie de l'érosion concentrée relayée par l'érosion éolienne au pied du versant oriental du volcan Mojanda (partie nord du bassin de Quito)



Dessin schématique du versant oriental du volcan Mojanda, profondément entaillé par le cañon du río Pisque. Le ruissellement décape les andosols vitriques au profit de la cangahua et le vent accumule les particules de sol contre les haies d'arbustes et d'eucalyptus.

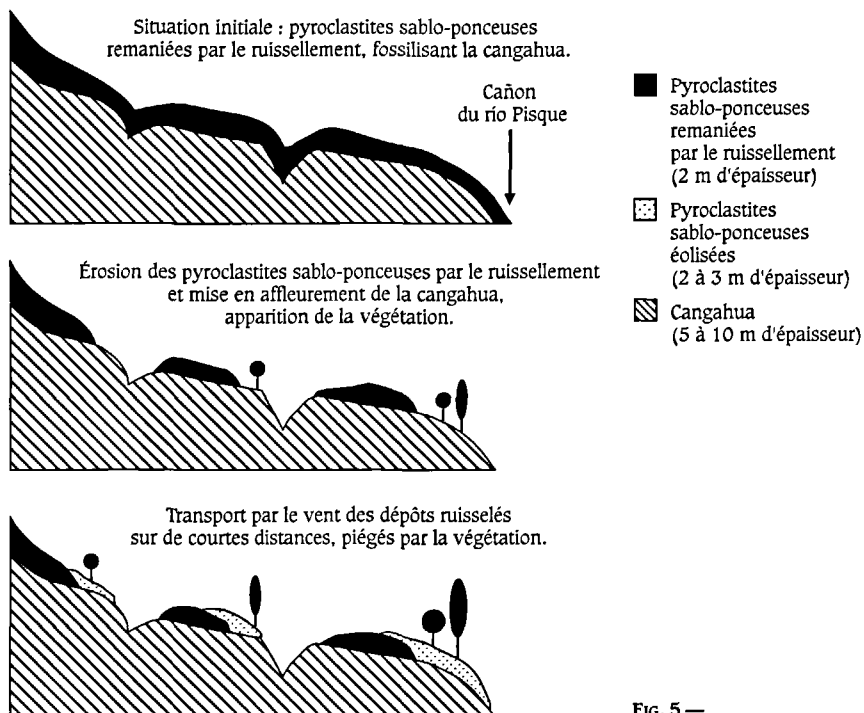


FIG. 5 —
Érosion des andosols vitriques sous l'action conjuguée du ruissellement et du vent

à la concavité basale (10 % à 15 % de pente) qui est profondément entaillée (plus de 100 m) par le cañon du río Pisque. Deux parties distinctes forment ce versant. La partie signalée par des hachures horizontales correspond à un secteur où la cangahua a été mise à nu. Aujourd'hui, l'érosion hydrique est limitée à l'action du ruissellement diffus.

L'autre partie du versant est représentée en gris avec des flèches noires. Elle est formée par des dépôts pyroclastiques constitués de sables fins d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, présentant quelques intercalations de pierres ponces de taille centimétrique. Cette formation couvre la cangahua et porte des andosols vitriques. Les coupes de terrain montrent que ces dépôts sont rarement en place et qu'ils ont subi un transport par les eaux de ruissellement. Les ponces, qui sont les éléments les plus grossiers, présentent des formes émoussées, parfois bien roulées. Les flèches noires, positionnées dans le sens de la plus grande pente du versant, indiquent la présence d'un réseau assez dense de rigoles et de petites ravines. La présence d'accumulations sableuses, piégées par la végétation et apparaissant au contact entre la cangahua et les incisions des ravins, témoignent aussi de l'action active de l'érosion éolienne.

Au cours des saisons pluvieuses (de septembre à novembre et de février à mai), le ruissellement crée un chevelu plus ou moins pérenne de rigoles associées localement à des ravines qui entaillent les pyroclastites et la cangahua. Durant les deux saisons sèches (de décembre à janvier et de juin à août), l'érosion concentrée cesse et la dynamique éolienne prend le relais. Des accumulations sableuses de type rebdous et nebkas, d'ordre décimétrique et métrique, sont piégées par la végétation, essentiellement herbacée et arbustive ponctuée par quelques eucalyptus, en bordure des petits ravins et du grand cañon du río Pisque (carte 12 et fig. 5). Sur les andosols vitriques apparaissent aussi des micro-yardangs centimétriques, situés en général à une dizaine de mètres des accumulations de sable, ce qui témoigne des courtes distances parcourues par les sables éolisés.

Les petits paysans à la recherche de nouvelles terres sont conduits à mettre en culture (maïs et haricot) les accumulations sableuses et à y faire paître moutons et chèvres. Ce processus contribue à réactiver la dynamique car la végétation, qui fixait en partie le sable, est dégradée et ne peut plus jouer son rôle.

Pour répondre à l'attente du partenaire équatorien, les informations dérivées des cartes au 1 : 200 000, complétées par les relevés de terrain, ont été rapportées à l'échelle du pays, ce qui donne la carte synthétique 13, à l'échelle de 1 : 4 000 000³ (DE NONI et NOUVELOT, 1983 ; ALMEIDA *et al.*, 1984). Une carte à petite échelle, accompagnée d'une légende simple et claire, est un outil préliminaire d'aide à la décision qu'utilisent volontiers les décideurs et les politiciens.

Cette carte souligne l'ampleur de l'érosion dans la Sierra par rapport à la Costa et à l'Oriente qui ne sont que peu ou pas affectés. Aux marges extérieures de la Sierra, sur les hautes terres et sur les versants tournés vers la Costa et l'Oriente, l'érosion est globalement moins étendue qu'à l'intérieur, dans la dépression interandine. Sur ces marges extérieures, les seules zones affectées sont les unités de forme allongée qui correspondent au tracé des axes de communication traversant la chaîne.

Les zones les plus érodées se situent donc entre les cordillères dans la dépression interandine, quelle que soit la nature des substrats. Globalement, les empreintes de l'érosion semblent plus denses dans la Sierra nord et centre, domaine des pyroclastites, qu'elles ne le sont dans la Sierra méridionale.

En conclusion, le tableau ci-après (tabl. IV) rappelle les principales caractéristiques des dynamiques qui affectent les versants aménagés de la Sierra.

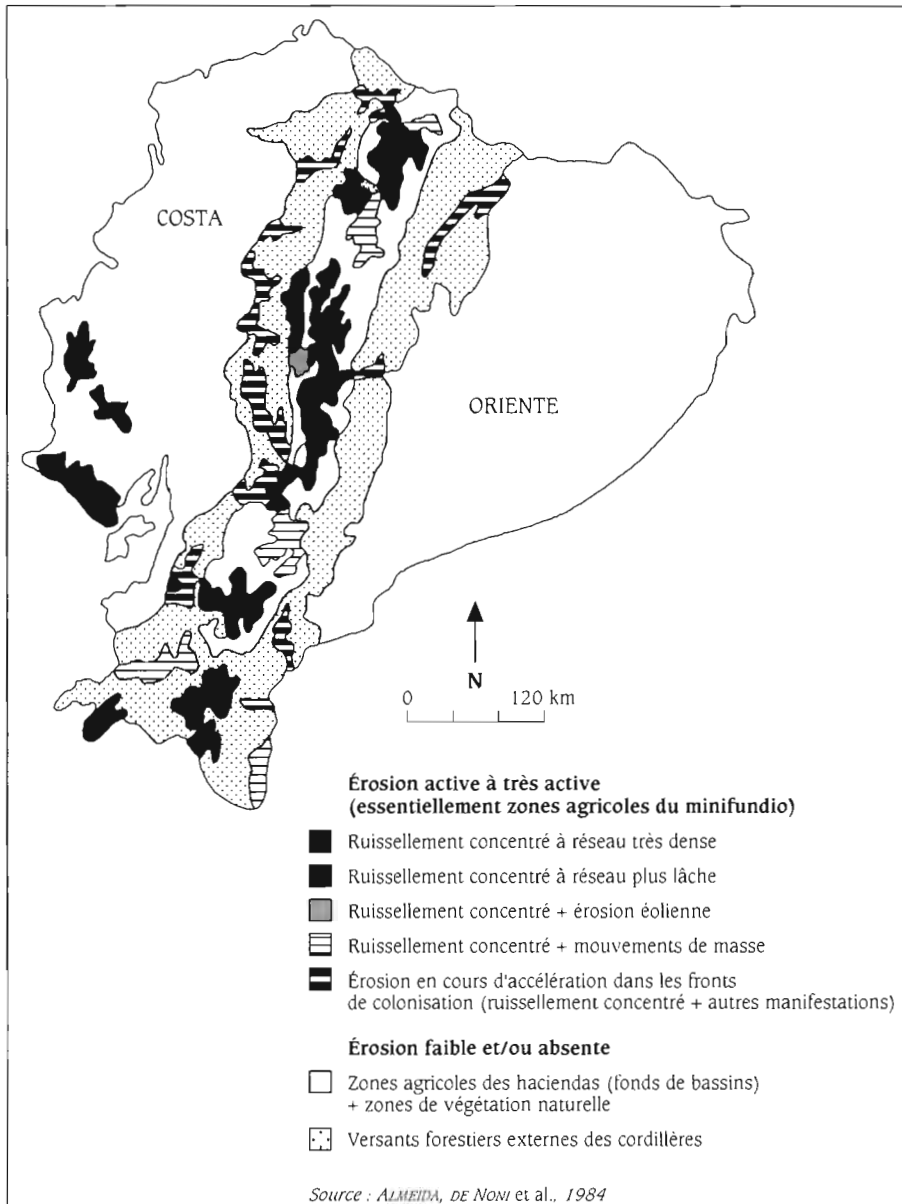
Leur répartition dans les paysages permet de souligner la place des facteurs suivants :

– les facteurs d'ordre spatial : les dynamiques sont très actives dans les zones agricoles aménagées. Dans toute la Sierra, l'étage compris entre 1 500 et 3 000 mètres, où les productions agricoles associent maïs et pâturages, est le plus érodé. Cet étage a été mis en valeur très tôt par les sociétés pré-incaïques puis il a été fortement sollicité à partir de la conquête espagnole. Comparativement, l'étage des hautes terres et des versants externes des cordillères présente un réseau de ravines plus lâche. Pendant très longtemps, cet étage n'a pas été utilisé. Néanmoins, le développement croissant des défrichements depuis une trentaine d'années favorise une dynamique de ravinement de plus en plus accentuée. Dans certains secteurs plus sensibles (pente, cendre sablo-ponceuse, sécheresse et sols mal couverts), les effets de l'érosion hydrique sur les versants rappellent les situations existantes dans les bassins ;

– les facteurs d'ordre lithologique : les ruissellements concentré et diffus fournissent un bon exemple, illustré sur la figure 6. Le rôle joué par ces facteurs y apparaît : sur substrat volcanique, le haut des versants se

Caractéristiques des dynamiques érosives dans la Sierra

³ Dans la pratique, pour réaliser cette carte, nous sommes partis des unités existant sur les cartes à 1 : 200.000 des sols et d'utilisation des terres auxquelles ont été rajoutés les relevés de terrain. Sur chaque carte, des calques ont été posés et seules les unités dont la taille était suffisamment grande pour supporter une réduction d'échelle ont été retenues. À ce niveau, les critères humains ont pesé fortement dans la sélection, par exemple, la proximité de l'unité par rapport à une zone agricole active ou à une zone de défrichement appelée à se développer. Des réductions successives par photocopies ont ainsi permis de passer du 1 : 200 000 au 1 : 4 000 000.



caractérise par un réseau de rigoles et de ravines relayées par le ruissellement diffus qui affecte la cangahua. Le ruissellement concentré se manifeste à nouveau à l'aval ; sur substrat sédimentaire, le ruissellement diffus agit sur le haut du versant puis lui succède le ruissellement concentré marqué par un réseau dense de rigoles et de ravines, puis par des bad-lands à l'aval du versant ;

DYNAMIQUES	SUBSTRAT, SOLS, UTILISATION DES TERRES		PENTES ET FORMES D'ÉROSION
	Substrat Volcanique	Roches du socle et sédimentaires	
Ruissellement concentré relayé spatialement par ruissellement diffus	- Pyroclastites sabro-ponceuses (andosols vitriques) sur cangahua - Maïs (2 500-3 000 m), orge, fève, pomme de terre (3 200-3 600 m)		Pentes de 5 à 70 % - Chevelu lâche rigoles + ravines sur pyroclastites, - Chevelu plus dense, ravines entaillant pyroclast. + cangahua Pentes de 5 % à 40 % - R. diffus sur cangahua Pentes > 40 % - Ravines localisées sur cangahua ÉVOLUTION VERS DÉCAPAGE GÉNÉRALISÉ DE LA CANGAHUA
Ruissellement diffus relayé spatialement par ruissellement concentré		Altérites sur roches du socle (sols feral. et fersial.) et dépôts de sable, argile, conglomérat (sols molliques) - Maïs, canne à sucre et café sur les cordillères (1 500-3 200 m)	Pentes de 5 % à 15 % - R. diffus sur sommet des versants Pentes de 20 % à 70 % - Chevelu dense rigoles + ravines sur partie rectiligne des versants Pentes de 10 % à 20 % - Ravinement généralisé à la base des versants ÉVOLUTION VERS BAD-LANDS
Ruissellement concentré relayé spatialement par mouvements de masse	- Pyroclastites argileuses (andosols molliques) sur cangahua - Pâturages (2 500-3 200 m)	Altérites sur roches du socle et couches d'argile (sols vertiques) - Pâturages (2 500-3 200 m)	Pentes 10% 15 % à 40 %
			Substrat volcanique - Paquets de sol glissés, cisail. (mouv. masse superfi./reptation) - Talus d'érosion façonnés par R. concentré + ravinement ÉVOLUTION VERS DÉCAPAGE GÉNÉRALISÉ DE LA CANGAHUA
Ruissellement concentré relayé temporellement par érosion éolienne	- Pyroclastites de sables fins (andosols vitriques) sur cangahua - Maïs (2 500-3 000 m)/orge, pomme de terre (3 200-3 600 m)		Pentes de 5 % à 40 % pluie < 600 mm/an, zones très exposées aux vents dominants (foehn) - Chevelu lâche, rigoles + ravines (sept-nov. et fév.-mai) - Nebkas, rebdous, petites barkanes (déc.-jan. et juin-août) ÉVOLUTION VERS DÉCAPAGE GÉNÉRALISÉ DE LA CANGAHUA

Tabl. IV — Caractéristiques des dynamiques d'érosion de la Sierra

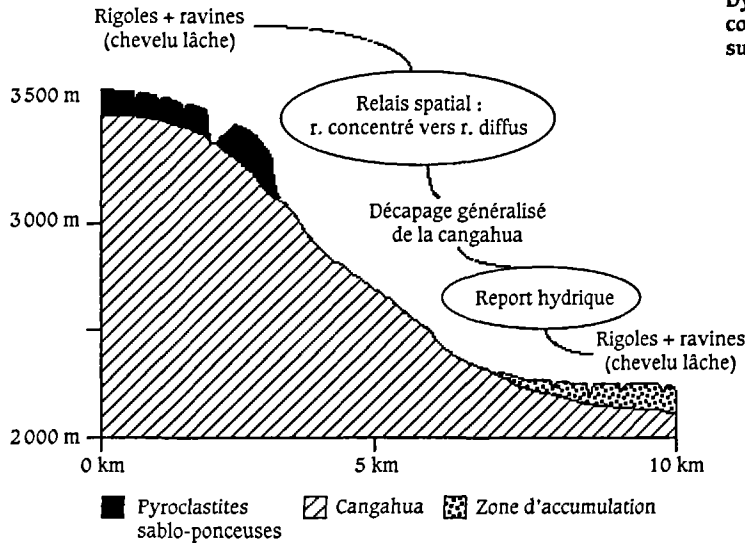
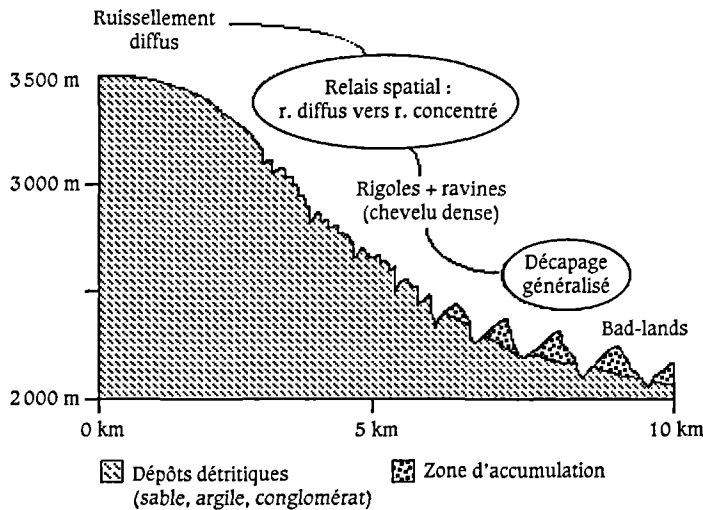
Substrat volcanique

FIG. 6 —
Dynamique du ruissellement
concentré et diffus
sur deux types de substrats

Substrat sédimentaire

– les facteurs d'ordre temporel : l'exemple le plus probant est donné par l'érosion concentrée relayée par l'érosion éolienne. Il concerne les régions faiblement arrosées où la sécheresse sévit annuellement, durant au moins deux mois consécutifs, ce qui permet à l'érosion éolienne de prendre le relais de l'érosion concentrée.

L'importance de l'érosion au long des versants est aussi mesurable grâce à l'accumulation de dépôts en bas des pentes. Les seules données disponibles concernent les études d'alluvionnement effectuées au barrage de la rivière Paute appartenant au grand bassin hydrographique de Santiago (Province de l'Azuay). Les mesures effectuées dans cet ouvrage, qui est le plus grand complexe hydro-électrique du pays, permettent d'évaluer des valeurs importantes de pertes en terre, de l'ordre de $4,89 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, soit $943 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Le seul bassin versant de Paute, d'une superficie de $5\,186 \text{ km}^2$, se subdivise en 15 sous-bassins de 60 à $1\,200 \text{ km}^2$ dans lesquels les pertes annuelles vont de 715 à $2\,500 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Sur de plus petits bassins, tels que Gualaceo, Jadan ou Burgay, les valeurs maximales mesurées atteignent $5\,000$ à $6\,000 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Globalement, ces valeurs correspondent à une érosion importante et, malgré le caractère estimatif de ce type de mesures, elles concordent avec les chiffres proposés dans les Andes par F. FOURNIER (1960) dans son étude sur le climat et l'érosion, plaçant cette partie de la Sierra au même niveau que certaines régions à forte érosion de la Chine, des USA ou de l'Inde.

Pour passer de l'évaluation qualitative et spatiale de l'érosion à la lutte antiérosive, il s'est avéré nécessaire de mesurer les processus. Cette étape importante du programme est exposée dans la deuxième partie de l'ouvrage.



Mesurer l'érosion et le ruissellement

Les parcelles expérimentales et la simulation de pluies

La connaissance des processus d'érosion en Équateur n'est pas une fin en soi mais l'étape préliminaire d'une démarche visant à déterminer les procédés de lutte antiérosive les mieux adaptés au minifundio de la Sierra. Si l'approche historique et qualitative exposée dans les chapitres précédents est utile pour définir le cadre spatio-temporel et l'environnement physique et humain des dynamiques érosives dominantes, elle est en revanche insuffisante pour répondre à certain nombre d'interrogations posées par la lutte antiérosive. En effet, il est fondamental d'analyser l'influence des principaux facteurs de l'érosion – pente, sol, pluie, cultures et pratiques culturelles – afin de pouvoir hiérarchiser leur degré d'implication dans l'accélération des dynamiques avant de passer à l'étape de la lutte antiérosive. Observer les comportements de ces facteurs de façon continue, jour après jour durant plusieurs années, mesurer leurs effets spécifiques et leurs possibles interactions a nécessité, par rapport aux limites de l'approche qualitative initiale, la mise en œuvre d'une approche expérimentale et quantitative.

En outre, ce type d'approche s'est imposé pour son aspect pratique, car il permet de travailler dans de vraies conditions de terrain, dans le minifundio, et de faire participer les paysans, un des points essentiels recherchés pour mener à bien l'étape finale de la lutte contre l'érosion. Les observations ont donc été réalisées sur des stations de mesures du ruissellement et de l'érosion localisées dans le minifundio, choisies en accord avec les paysans et suivies en liaison étroite avec eux.

Ainsi, nous nous sommes efforcés de suivre l'objectif fixé par le partenaire équatorien en menant une démarche à la fois cognitive et appliquée, qui

visé à suivre le déclenchement et le fonctionnement des processus en fonction des modes de cultures, des calendriers culturaux et du choix des végétaux.

L'approche expérimentale et quantitative

Cette approche est fondée sur un réseau de stations composées de parcelles expérimentales sur lesquelles les dynamiques érosives ont été mesurées durant cinq ans, sans interruption. Elle repose également sur la réalisation de campagnes de simulations de pluies sur les sites des stations, qui ont permis d'acquérir des données complémentaires à celles issues des parcelles expérimentales.

Notre démarche rejoint les travaux de Bennett et de Hudson, qui ont marqué les recherches sur l'érosion et la conservation des sols. Dans le bulletin n° 68 de la FAO (1993), Hudson a réalisé une synthèse des principales méthodes utilisées par la recherche pour mesurer sur le terrain le ruissellement et l'érosion. Il souligne que les courants actuels de la recherche suivent essentiellement trois types de méthodes qui se distinguent par les échelles d'approche envisagées : l'échelle kilométrique pour les bassins versants, l'échelle décamétrique ou hectométrique pour les parcelles expérimentales et l'échelle métrique pour les simulations de pluies. Concernant les bassins versants, Hudson estime qu'ils constituent un excellent support pour mesurer l'érosion des terres à l'échelle d'une région mais qu'ils ne sont pas assez précis pour permettre d'évaluer le phénomène à l'échelle de la parcelle paysanne. Dans ce dernier cas, il préconise l'emploi des parcelles expérimentales et de la simulation de pluies.

Concernant les parcelles expérimentales, notre approche se situe dans le droit fil d'anciens travaux menés en Afrique par FOURNIER (1960) qui, du côté francophone, a été pionnier dans ce domaine. Il souligne : « Chaque champ (parcelle expérimentale) est représentatif d'une condition bien définie du milieu naturel : association d'un degré de pente, d'une nature de sol et d'un état de surface soit naturel, soit créé par l'homme. Ces mesures, associées à celles de la pluviosité et du ruissellement pendant le même temps, expriment la grandeur de l'érosion créée par ces deux facteurs dans un milieu naturel donné [...] On conçoit immédiatement tout l'intérêt que revêtent des données chiffrées tirées de cette investigation scientifique : elles doivent permettre de serrer de très près le problème posé. »

Les parcelles expérimentales de ruissellement

La parcelle de ruissellement est une portion de terrain limitée artificiellement, de forme rectangulaire, située sur un versant et à l'intérieur d'une parcelle paysanne. Elle est délimitée par des planches de bois fichées dans le sol, la jointure entre planche et angles droits de la parcelle est assurée par des morceaux de zinc cloués sur les planches. Un fossé ceinture la parcelle dans son tiers amont afin d'assurer une bonne étanchéité en l'isolant de possibles apports d'eau extérieurs. Des bacs de tôle, munis de 11 partiteurs chacun et reliés à la parcelle par un canal en ciment légèrement incliné, sont placés au pied des parcelles et servent à mesurer les pertes en eau (ruissellement) et les pertes en terre (érosion). Chaque site est pourvu d'un pluviographe destiné à mesurer la pluie et ses principales caractéristiques, notamment son intensité, paramètre déterminant dans le déclenchement du ruissellement et de l'érosion.

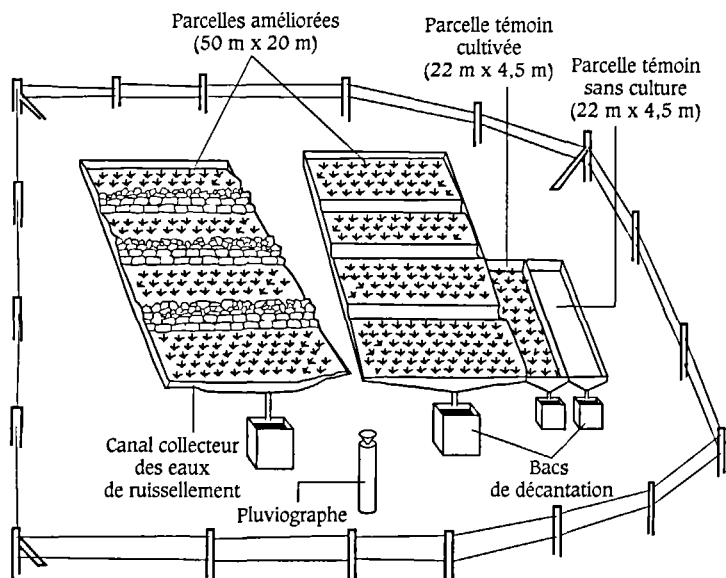
Selon les sites, la station se compose de trois ou quatre parcelles (fig. 7) :

- un couple de deux parcelles, dites « témoins » parce qu'y sont reproduits les modes de travail du sol et de cultures, selon les calendriers culturaux traditionnellement pratiqués par le minifundio. L'une est plantée¹ et l'autre ne l'est pas ;
- une ou deux parcelles travaillées et plantées, dites « améliorées » parce qu'y sont testées des méthodes de lutte antiérosive.

¹ Nous avons utilisé les termes consacrés par l'agronomie : la parcelle est dite travaillée si un travail superficiel du sol est effectué manuellement à 0,15-0,20 m de profondeur. Elle est dite travaillée et plantée si elle porte un semis de culture. Une parcelle travaillée et plantée est une parcelle cultivée.

L'objectif est d'évaluer sur chaque type de parcelle les facteurs déclenchants, physiques et agronomiques, de l'érosion puis de comparer les comportements des différentes parcelles, afin d'évaluer l'efficacité des méthodes de lutte antiérosive testées.

FIG. 7 — Dispositif utilisé en station pour l'étude expérimentale du ruissellement et de l'érosion, en situation traditionnelle (témoin) et améliorée



En théorie, l'idéal serait de débiter les mesures sur le couple de parcelles témoins et de n'installer les parcelles améliorées que plus tard, une fois mieux appréhendés les mécanismes et les causes des processus agissant en situation de culture traditionnelle. Dans la pratique, cela est difficilement réalisable, car un tel programme nécessiterait un nombre d'années trop important. Aussi, nous avons installé les parcelles témoins et améliorées simultanément, avec l'idée que ces dernières pourraient être modifiées, si besoin était, à mesure que les parcelles témoins livreraient leurs résultats.

Dans cette deuxième partie seules seront analysées les parcelles témoins ; les parcelles améliorées seront étudiées dans la troisième partie.



Des stations formées de parcelles expérimentales de ruissellement sont installées dans le minifundio et sont suivies durant plusieurs années avec la participation du paysannat.

Sur les petites parcelles (20 m x 5 m), les mesures quantifient l'érosion résultant des pratiques agricoles traditionnelles.

Sur les grandes parcelles (50 m x 20 m) où sont introduites des pratiques antiérosives, les mesures obtenues permettent d'évaluer leur efficacité.

Au total, un réseau de 7 stations et de 25 parcelles de ruissellement a été installé dans différentes régions de la Sierra.

La photo présente la station de Mojanda (3 300 m, 40 % de pente).

Pour mesurer l'érosion, il est nécessaire de recueillir l'eau de ruissellement et les sédiments en suspension en provenance de la parcelle. Un dispositif de prélèvement qui comprend plusieurs bacs de décantation est installé au pied de la parcelle.

Le second bac est muni de 11 partiteurs : 10 partiteurs conduisent l'eau hors du dispositif et un seul, le 6^e, est relié au bac suivant.

Il faut donc ensuite multiplier par 11 les quantités d'eau et de sédiments.

Ce système est pratique car il limite le nombre de bacs tout en permettant de mesurer une érosion importante.



Dans chaque station sont placées deux parcelles témoins, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- la première parcelle témoin, travaillée et plantée, de 100 m² (20 X 5 m) de surface, est conduite selon les pratiques culturales en usage dans le minifundio. Les travaux sont manuels et réalisés conjointement avec les paysans du site, depuis le semis jusqu'à la récolte. Le travail du sol est effectué de façon isohypse avec une sorte de houe, l'*asadon*, jusqu'à une quinzaine de centimètres de profondeur. Le buttage et le désherbage sont accomplis deux fois durant le cycle cultural ;

– la seconde parcelle témoin, travaillée superficiellement, non plantée, également de 100 m² (20 X 5 m) de surface, est labourée et ratissée et ne porte ni végétation ni culture (témoin non plantée). L'intérêt de cette seconde parcelle témoin est de pouvoir préciser l'action du sol et de la pente en éliminant les effets consécutifs à la culture et au travail du sol. Cette parcelle est travaillée une fois par an, au moment où le sol de l'autre parcelle est préparé pour le semis, et elle est désherbée chimiquement lorsque le développement du couvert végétal le requiert.

L'utilisation de parcelles de ruissellement n'est pas une méthode nouvelle. Rappelons que les chercheurs américains furent les premiers à mener des recherches sur l'érosion et qu'ils employèrent largement les parcelles de ruissellement pour répondre à la grave crise érosive qui affecta les États-Unis dans les années trente-quarante. À partir de là furent obtenus plusieurs milliers de données provenant de 45 stations de recherche des États-Unis, que WISCHMEIER et SMITH (1978, 1981) traitèrent statistiquement pour proposer une équation, dite « universelle », de prévision de l'érosion. Cette équation fait intervenir cinq facteurs : R, l'érosivité des climats ; K, l'érodibilité des sols ; SL, la longueur et l'inclinaison de la pente ; C, les techniques culturales ; P, les pratiques antiérosives. Elle permet donc de distinguer de manière commode l'effet de chacun des facteurs : par exemple, une influence majeure est attribuée à l'énergie de la pluie qui donne de bonnes relations avec l'érosion en nappe, pour le moins telle qu'elle intervient aux États-Unis.

Néanmoins, la similitude de notre démarche avec les travaux américains s'arrête là, car notre objectif est en fait très différent. Il n'a pas été envisagé d'utiliser les données des parcelles pour quantifier l'érosion par des extrapolations aux échelles du bassin versant ou de la région. En installant nos stations chez les paysans au lieu d'user des stations agronomiques existantes, faciles d'accès et disposant d'un bon dispositif métrologique, nous avons fait le choix d'être moins précis sur la qualité des mesures et mis l'accent sur la participation paysanne. Loin d'extrapoler donc, nous sommes conscients que les mesures obtenues ne sont significatives que des parcelles sur lesquelles elles ont été effectuées. En ce sens, nous sommes donc pleinement en accord avec les mises en garde de TRICART (1965, 1978) sur les risques liés au transfert d'échelles à partir des seules parcelles de ruissellement.

En outre, notre approche se distingue par son objet d'étude, l'érosion concentrée, qui est la dynamique dominante dans la Sierra, alors que l'équation des Américains est adaptée à l'érosion en nappe. Cette

équation ne tient pas compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente, qui sont des processus déterminants de l'érosion concentrée. Il semble qu'en montagne les sols sur pente infiltrent mieux l'eau, d'une part, parce que les particules fines sont exportées vers le bas alors que si elles restaient sur place elles colmateraient la porosité et diminueraient l'infiltration ; d'autre part, parce que le ruissellement, en se concentrant, incise le sol, brise les croûtes de surface et ouvre des voies à l'infiltration de l'eau. Malgré ces bonnes conditions d'infiltration, l'érosion est un phénomène actif en montagne, aux conséquences généralement plus graves qu'en plaine car l'inclinaison de la pente est un puissant facteur d'accélération du transport des particules (ROOSE, 1981, 1994 ; LAL, 1982, 1988 ; POESEN, 1987 a ; POESEN et BRYAN, 1989-1990).

L'érosion concentrée pose donc un certain nombre de questions nouvelles auxquelles ne répondent pas les données issues de l'érosion en nappe sur laquelle s'est fixé l'intérêt des chercheurs durant de nombreuses années. Les parcelles de ruissellement, qui permettent d'observer expérimentalement l'effet du facteur pente, constituent un bon support d'étude de l'érosion en montagne.

La simulation de pluies est une méthode expérimentale qui complète les données issues des parcelles expérimentales de ruissellement. Elle permet notamment d'isoler l'étude du sol, dont le comportement, en tant que support à la fois des cultures mais aussi des manifestations de l'érosion, est un facteur fondamental à prendre en compte dans une recherche sur la lutte antiérosive. Le comportement du seul facteur sol ne peut être isolé sur les parcelles de ruissellement où sont toujours associés les effets sol – pente – pluie et modes et types de cultures lorsque ces derniers sont présents. Par exemple, à partir d'une parcelle de ruissellement sur sol nu, qui est le cas le plus simple où n'interviennent que trois facteurs – pente, sol et pluie –, il n'est pas possible à partir des mesures effectuées de dissocier les effets de chacun de ces facteurs.

Quel est l'effet sol sur l'érosion, en particulier sur l'infiltration et la naissance du ruissellement ? L'effet sol se combine-t-il à un autre facteur dominant pour accélérer l'érosion ? Quel est l'effet sol avant et après la mise en culture ? Ce sont autant de questions auxquelles la simulation de pluies peut aider à répondre.

Les simulations de pluies

Cette technique a pris un large essor au cours des quinze dernières années. Elle permet, grâce à un dispositif adapté, de reproduire expérimentalement l'impact des gouttes de pluie sur le sol. Il est ainsi possible d'effectuer une analyse fine des phénomènes de détachabilité (« splash ») et d'évaluer à la surface du sol le devenir de l'eau par infiltration et par naissance du ruissellement.

Avant la mise au point du simulateur de pluies, la technique la plus utilisée était celle de Pioger (VALENTIN, 1985). Elle consistait à remplir d'eau un petit cylindre fiché dans le sol et à mesurer la vitesse d'abaissement du niveau de l'eau dans le sol. Le principal défaut de cette méthode était d'ignorer l'impact des gouttes de pluie sur le sol et leur action sur l'évolution des états de surface. En ce sens, la simulation de pluies, en reproduisant expérimentalement des pluies d'intensité proche des pluies naturelles et en assurant le contrôle des paramètres correspondants (durée et hauteur des pluies en particulier), représente un réel progrès.



La simulation de pluies apporte des enseignements complémentaires aux mesures effectuées sur les parcelles expérimentales de ruissellement. Elle permet notamment d'isoler le comportement du sol et d'évaluer sa susceptibilité à la battance de la pluie, « son érodibilité », sur une petite surface de 1 m². Ici, le simulateur de pluies est installé sur l'une des petites parcelles de ruissellement de la station de Mojanda, sur une pente de 40 %.

Il existe plusieurs types d'appareils pour simuler les pluies. On peut distinguer deux modèles principaux (VALENTIN, 1985) :

- le premier utilise des dispositifs producteurs de gouttes. Les appareils les plus simples produisent des gouttes de même taille et il est possible, grâce à l'adjonction d'un ventilateur, de créer des gouttes plus fines et mieux réparties sur la surface du sol. D'autres appareils permettent de produire des gouttes de taille différente par l'utilisation d'embouts de diamètres variés, de tubes capillaires ou d'aiguilles hypodermiques. Mais ce type d'appareil fournit des gouttes d'eau dont il est difficile d'évaluer l'énergie cinétique par rapport aux pluies naturelles. En effet dans ce type d'appareil, la hauteur de chute des gouttes est limitée en général à quelques décimètres, alors que dans la nature les gouttes nécessitent, en fonction de leur grosseur, une hauteur comprise entre 5 et 10 m pour atteindre leur vitesse limite dans l'air ;
- le second appareil emploie de l'eau sous pression et des gicleurs, ce qui permet de reproduire une énergie cinétique proche de celle des pluies naturelles. Ce type de dispositif peut arroser des surfaces de grande dimension. Le plus grand simulateur est de type Swanson (ROOSE, 1981 ; COLLINET, 1988). Il est pourvu de dix bras tournant autour d'un axe fixe à 3,50 m au-dessus du sol, et il arrose une surface de 200 m². La construction d'un appareil plus petit, plus maniable et moins onéreux s'est révélée nécessaire afin de pouvoir exploiter cette technique et multiplier les sites de mesures. Cela a été à l'origine de la création d'un mini-simulateur de pluies de type Orstom et de l'amélioration des techniques infiltrométriques évoquées antérieurement (ASSELIN et VALENTIN, 1978). C'est ce type d'appareil que nous avons utilisé dans la Sierra de l'Équateur (ASSELIN *et al.*, 1993). Il est constitué d'une tour pyramidale de 4 m de hauteur qui peut recevoir une bâche qui protège des effets du vent durant les essais. Au sommet de cette tour se trouve un gicleur calibré, monté sur un bras mobile permettant d'arroser une aire d'environ 4 m². Un dispositif a été prévu pour maintenir, quelle que soit la pente, l'axe d'oscillation du gicleur au-dessus du centre d'une micro-parcelle de 1 m², matérialisée par un cadre métallique qui limite la zone d'étude. Les intensités peuvent varier de 15 à 140 mm h⁻¹, en fonction du réglage choisi. L'ensemble est facilement transportable dans un véhicule léger. Il faut environ deux heures à 4 personnes pour monter l'appareil et préparer le premier essai. Une quantité d'eau d'environ 500 litres est nécessaire pour réaliser un essai d'une heure (fig. 8).

² L'avantage majeur de cet appareil est qu'il arrose une grande surface où il est possible de reproduire les deux phases principales de production ou de naissance et de transfert du ruissellement. En revanche, son coût d'entretien et d'installation est élevé, ce qui limite évidemment son utilisation : chaque bras est composé de 30 gicleurs qui nécessitent de grandes quantités d'eau (de 4 à 25 m³ par heure).

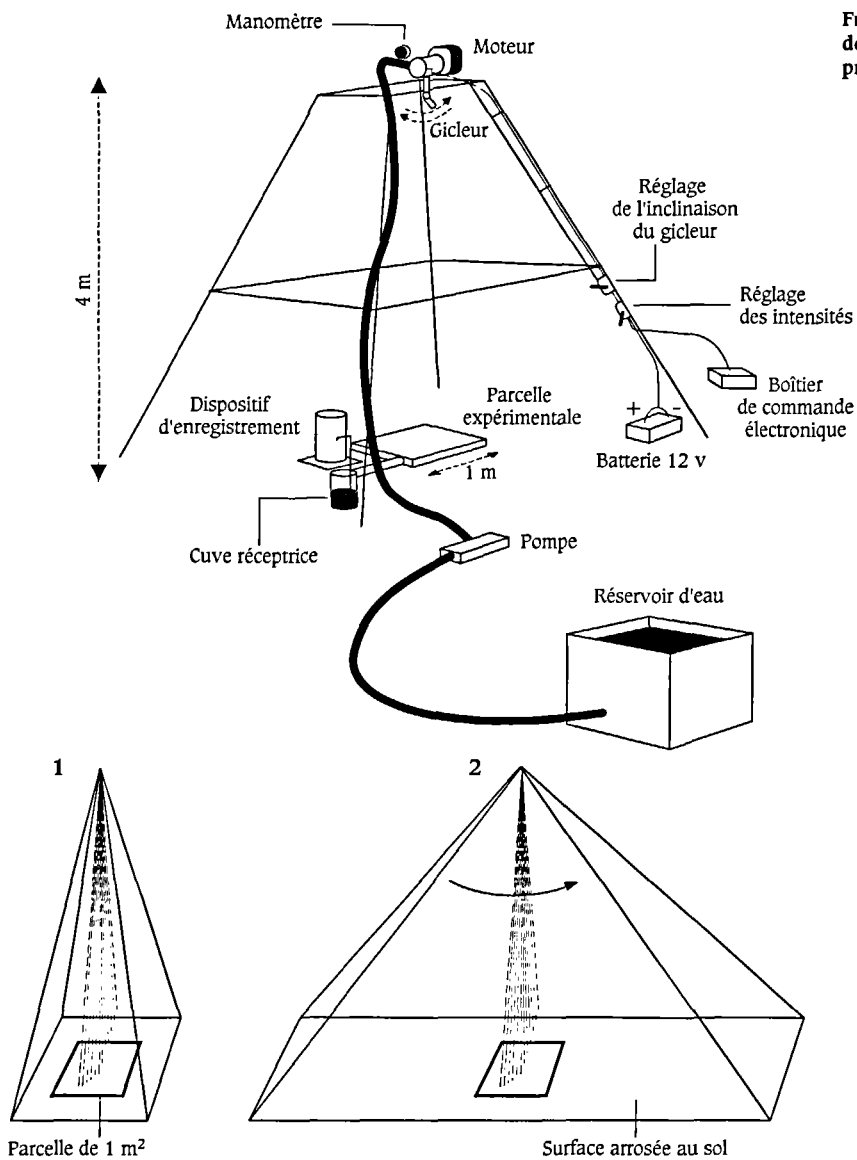


FIG. 8 — La simulation de pluies (dispositif et principes de fonctionnement)

Angle de balancement du gicleur :

1. Minimum : surface arrosée au sol minimum → intensité de la pluie maximum
2. Maximum : surface arrosée au sol maximum → intensité de la pluie minimum

Source : ASSELINE et VALENTIN, 1978 ; ASSELINE et al., 1993.

Type d'expérimentation	Pluie/durée de l'expérimentation	Surface	Effets testés et facteurs étudiés	Processus étudiés
Parcelles de ruissellement	naturelles au minimum 3 ans de mesures	de 50 à 1 000 m ²	Il est impossible d'étudier l'effet d'un seul facteur. Les résultats traduisent les effets cumulés des facteurs sol + pente + pluie + végétation	Énergie du ruissellement Énergie en nappe et concentrée
Simulation de pluies	artificielles mesures instantanées	1 m ²	Il est possible d'étudier l'effet d'un seul facteur : par ex. comportement du sol à la pluie simulée ou effet d'un couvert végétal. Par contre, l'effet « pente » ne peut être pris en compte du fait de la petite taille de la parcelle	Énergie de la pluie, naissance du ruissellement

Tabl. V — Apports et limitations des parcelles expérimentales de ruissellement et des simulations de pluies

Dans le tableau V ont été récapitulés les apports majeurs des parcelles de ruissellement et de la simulation de pluies.

Ces deux approches sont très intéressantes car elles permettent d'apprécier l'effet des différents facteurs de l'érosion, soit de manière groupée, soit de manière individuelle. Comme déjà signalé, les parcelles de ruissellement permettent de prendre en compte le facteur pente, très important en montagne, ce qui n'est pas possible avec la simulation de pluies, appliquée sur une microparcelle de pente trop courte. En revanche, la simulation de pluies permet d'isoler certains facteurs, notamment le sol dont l'effet est essentiel pour l'analyse du bilan infiltration/ruissellement. En définitive, ces deux approches sont très complémentaires, dans la mesure où l'action des deux processus majeurs de l'érosion peut être observée : sur les microparcelles de simulation de pluies, l'action de l'énergie des gouttes de pluies qui, en fermant la surface du sol, diminue l'infiltration et préside à la naissance du ruissellement ; sur les parcelles de ruissellement, l'action de l'énergie du ruissellement qui provoque le décapage du sol en griffes, rigoles et ravines.

Caractéristiques des stations

La Sierra a été divisée en cinq grands bassins, à la superficie comprise entre 8 000 et 12 000 km² (carte 14). Quatre d'entre eux se situent à l'intérieur de la Sierra : bassins volcaniques de Guayllabamba et de Pastaza, dans la Sierra nord et centre, et bassins cristallins et sédimentaires de Santiago et de Catamayo, dans la Sierra méridionale. Le cinquième, le bassin de Guayas, est situé sur le piedmont détritique de la Sierra, du côté occidental côtier, et porte des fronts pionniers paysans anciens.

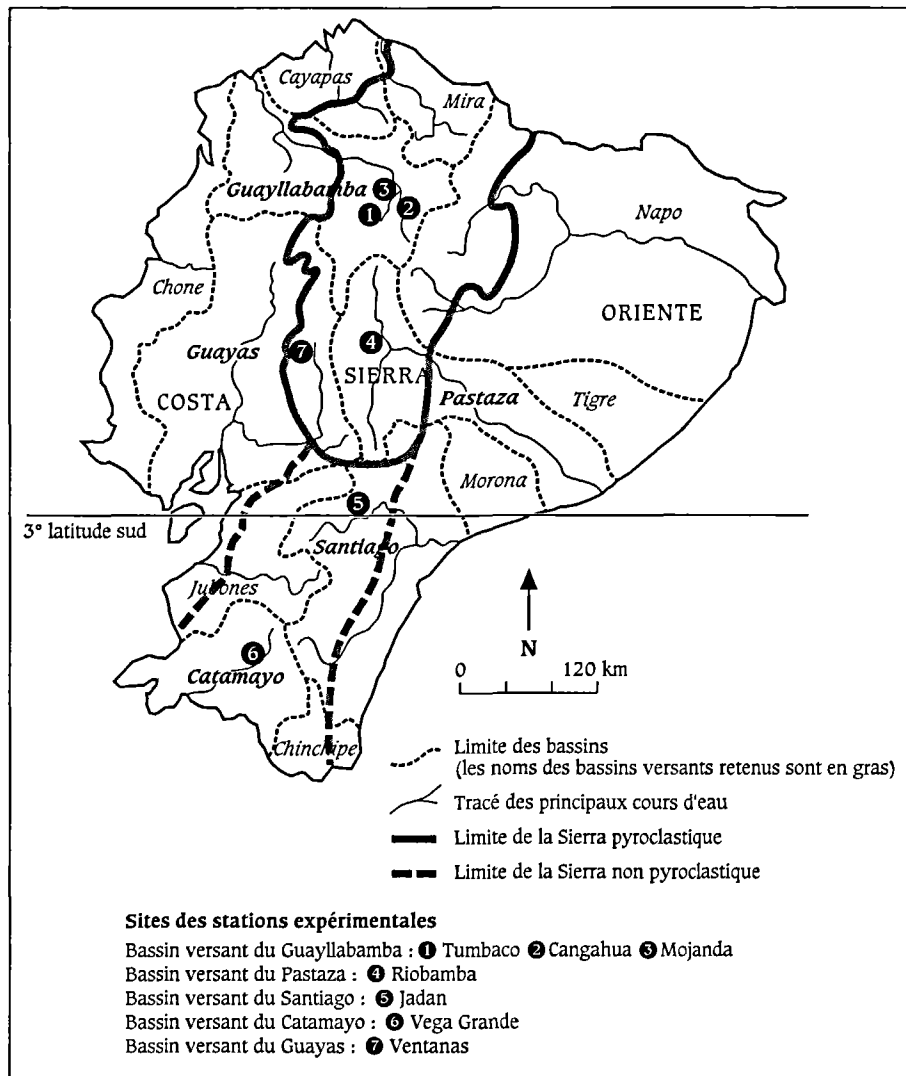
Au sein de ces grands bassins, les sites des stations ont été sélectionnés selon un certain nombre de caractéristiques estimées représentatives. Nous nous sommes référés à la topographie (pentes et altitudes), aux manifestations de l'érosion, au climat et aux sols – notamment à l'influence des matériaux volcaniques – ainsi qu'aux principaux types de minifundios et de cultures.

Ces deux bassins sont taillés dans des formations volcaniques, essentiellement pyroclastiques, qui sont le type de substrat qui forme l'ossature de la Sierra du Nord et du Centre. Ils englobent des éléments de relief appartenant aux hautes terres de la cordillère et aux vallées de la dépression, qui sont les deux unités physiques dominantes.

Les cordillères de la Sierra volcanique se caractérisent par des dénivelés considérables : de l'ordre de 3 000 à 3 500 m du côté extérieur et de

**Les bassins
versants
volcaniques
de Guayllabamba
et de Pastaza**

**Les cordillères
à hauts volcans**

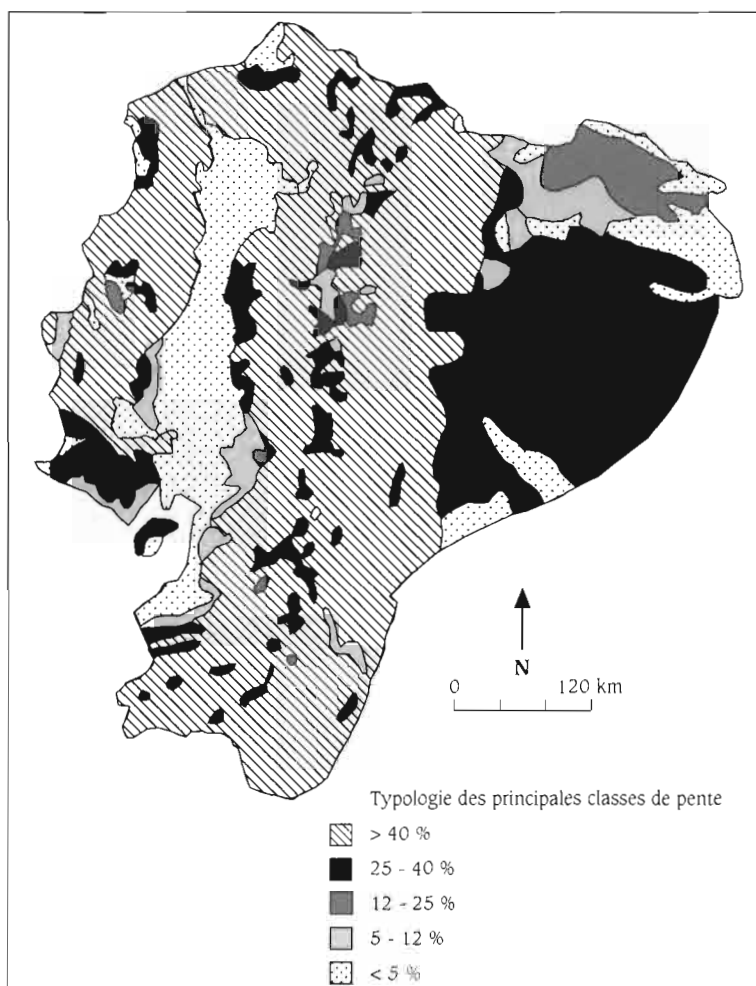


1 500 à 2 000 m au-dessus de la dépression. Les lignes de crêtes des cordillères se situent en moyenne à une altitude de 4 000-4 200 m et portent quelques grands volcans qui dépassent 5 000 m (cf. carte 9).

Les cordillères sont formées par trois types de paysages, d'est en ouest (fig. 9 et 10) :

– entre 3 000-3 200 m et 3 600-3 800 m d'altitude, les versants internes sont de longs versants rectilignes, de 40 % à 70 % de pente, situés au-dessus des bassins de la dépression et qui portent l'essentiel des cultures du minifundio ;

CARTE 15 —
Typologie des principales
classes de pente



– au-dessus de 3 600-3 800 m, les hautes terres présentent de grosses croupes convexes aux pentes comprises entre 20 % et 40 % jusqu'à 4 000-4 200 m d'altitude. Cette altitude est dépassée lorsque les hautes terres portent un volcan. Dans ce cas, la neige et la glace sont pérennes à partir de 4 600-4 800 m d'altitude ;

– entre les hautes terres et les piedmonts côtiers et amazoniens (500-600 m d'altitude) se développent les versants externes, longs versants rectilignes qui descendent en pente régulière (40 %-70 %) avant de se raccorder aux premiers cônes de déjection situés au pied de la chaîne.

Dans l'ensemble, les pentes sont fortes, voisines de 40 % ou supérieures (cf. carte 15). En raison des fortes altitudes et de la situation des cordillères, le climat est humide et froid. Les précipitations sont très

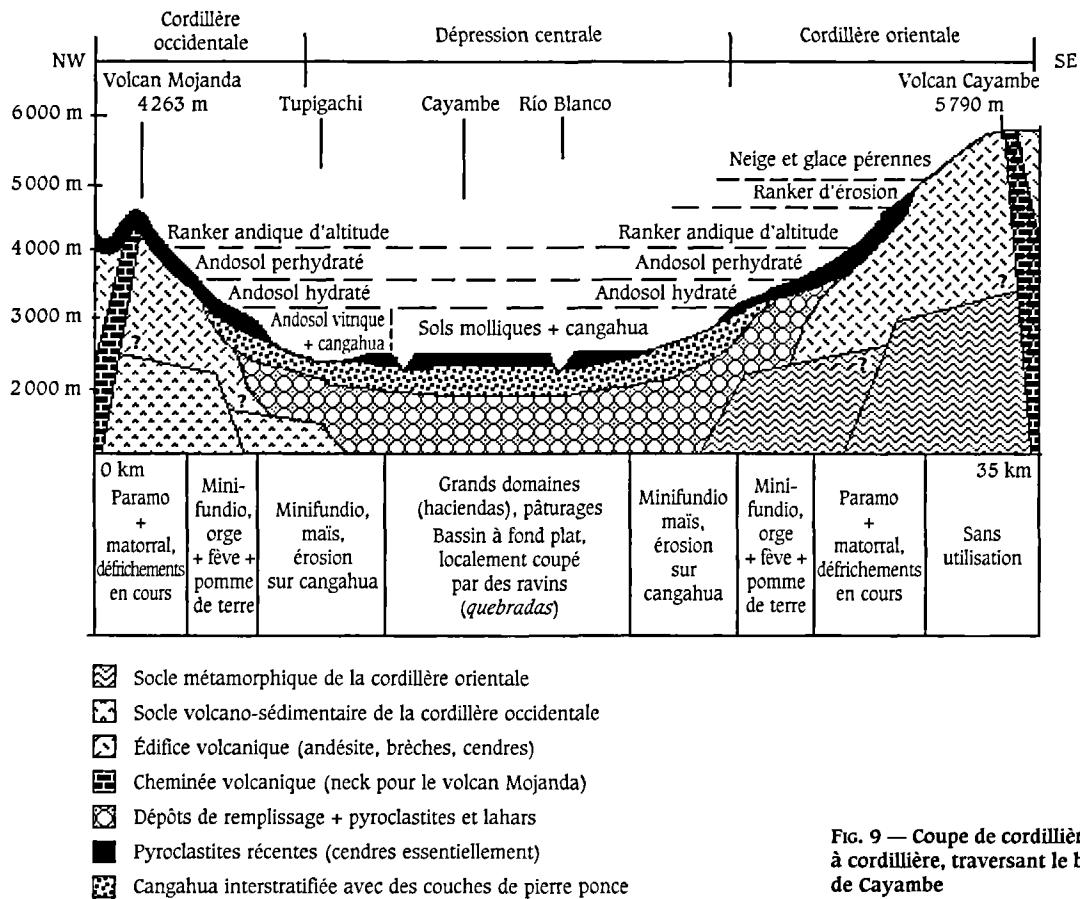


Fig. 9 — Coupe de cordillère à cordillère, traversant le bassin de Cayambe

élevées, de l'ordre de 2 000 à 4 000 mm par an selon les secteurs. Les effets du gel sont sensibles, en fonction de l'exposition des versants et de l'altitude. Les températures maximales dépassent rarement 20 °C et les minimales ont sans exception des valeurs inférieures à 0 °C. Les moyennes annuelles, quoique très variables, fluctuent le plus souvent entre 4 et 8 °C (POURRUT, 1994).

Les sols et leur environnement

Les sols étant dérivés du substrat volcanique, ce sont des andosols. Leur répartition (cf. carte 4 et fig. 9 et 10) est fortement dépendante des différents paramètres du milieu physique, notamment :

- de la pluviométrie élevée, qui favorise une altération poussée des matériaux d'origine, et permet le développement d'andosols riches en allophanes. Dans les montagnes humides, les verres volcaniques

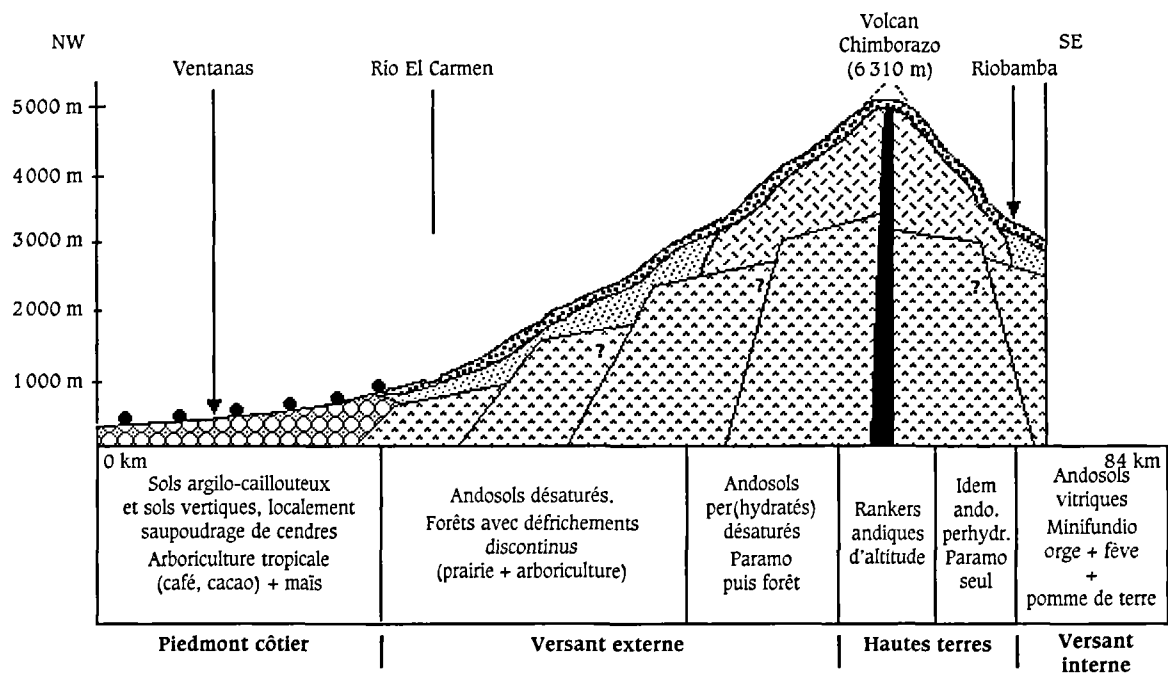


Fig. 10 — Coupe traversant le volcan Chimborazo, depuis le versant interne oriental jusqu'au piedmont côtier

- ☐ Socle volcano-sédimentaire, localement batholites de granite
- Cheminée de lave
- ▨ Cône du Chimborazo (andésite, cendres, brèches)
- ▤ Dépôts détritiques volcaniques (lahars + pyroclastites et coulées)
- ▥ Pyroclastites récentes
- ▧ Dépôts caillouteux et conglomérats
- Cônes de déjection récents, localement couverts par des cendres

s'altèrent en donnant un minéral, l'allophane. Cette dernière est un silicate d'alumine, comme l'argile, mais elle s'en distingue par sa structure amorphe et non pas organisée en feuillets. L'allophane favorise la formation de microagrégats très fonceés, de densité apparente faible (0,5-1), et stables, du moins avant la mise en culture (COLMET-DAAGE *et al.*, 1967, 1969 ; QUANTIN, 1992 a ; DUCHAUFOUR, 1995) ;

– de l'altitude, qui guide la répartition de différents types de sols sur les versants ; un étagement des sols apparaît depuis les hautes terres froides jusqu'au pied des versants où règnent d'autres conditions climatiques.

La coupe de la figure 9 permet d'apprécier l'organisation des andosols sur les hautes terres et les versants internes dans le bassin versant de

Guayllabamba. Cette coupe, de direction NW-SE, traverse la dépression centrale dans le bassin de Quito depuis le volcan Mojanda, dans la cordillère occidentale, jusqu'au volcan Cayambe, dans la cordillère orientale. Des hautes terres vers les versants internes, on distingue :

¹ Pour chaque type de sol, nous avons utilisé la classification française. En outre, l'équivalent dans la classification américaine des sols (Soil Taxonomy), utilisée habituellement par nos partenaires équatoriens, est indiqué entre parenthèses : les unités y sont désignées à l'aide de racines grecques et latines. Ici, le suffixe « ent » rappelle l'ordre des Entisols, qui sont des sols peu évolués sans horizon diagnostic (DUCHAUFOUR, 1995).

- au-dessus de 4 500 m, d'altitude, les rankers d'érosion (Orthents)¹. Ils sont composés d'un mince horizon noir, épais d'une quinzaine de centimètres, discontinu, riche en matière organique et d'aspect tourbeux. Il repose sans transition sur les roches de la cordillère, en place ou remaniées ;
- entre 3 800-4 000 m et 4 500 m d'altitude, les rankers andiques d'altitude (Cryaquands). Épais de 20 à 25 cm, ces sols, de couleur noire, sont riches en verre peu altéré et en matière organique peu



Paysage de cordillère à haut volcan, situé dans le grand bassin versant de Pastaza, sur les versants et hautes terres (3 400 m) qui bordent le bassin de Riobamba. Au premier plan, les paysans terminent la récolte de l'orge. Cet étage est désormais consacré à la culture alors qu'on y trouvait habituellement paramo et matorral. Au second plan apparaissent les neiges et glaces pérennes du volcan Chimborazo.

humifiée, à aspect de tourbe. Naturellement protégés par la végétation très dense du paramo, ces sols subissent par endroits, néanmoins, les premiers effets des fronts pionniers d'altitude ;

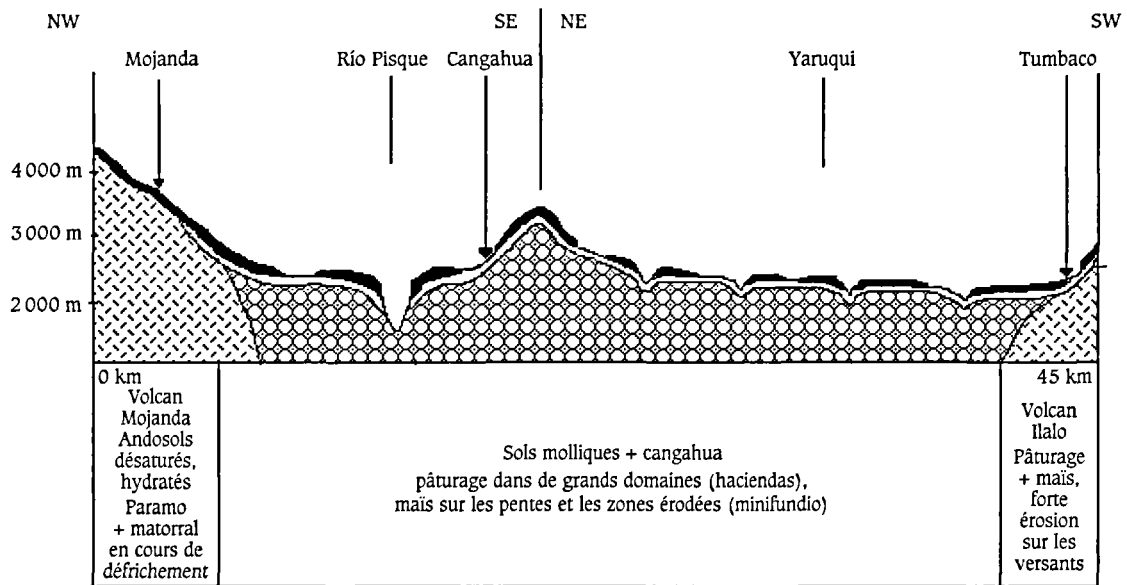
- entre 3 500 et 3 800 m d'altitude, les andosols désaturés perhydratés (Hydrudands). Développés sur plus de 1 m d'épaisseur, ils présentent des taux de matière organique et de débris végétaux non décomposés importants ainsi qu'un haut degré d'hydratation (COLMET-DAAGE *et al.*, 1967, 1969). Comme les sols précédents, ils portent une dense couverture herbacée de paramo. À leur limite inférieure apparaît un autre type de végétation naturelle constituée d'arbustes en formation très serrée, le matorral. L'agriculture, notamment l'élevage, s'intensifie dans cet étage ;
- entre 3 200 et 3 500 m d'altitude, les andosols désaturés hydratés (Melanudands). Épais également, ces sols sont riches en allophanes et moins hydratés. Ils présentent en surface un horizon humifère brun foncé d'une dizaine de centimètres, de structure fine, peu décomposé, passant progressivement à un horizon B massif, beige clair, de texture limoneuse. Ils sont fortement anthropisés et portent le damier caractéristique des petites parcelles contiguës du minifundio, où sont associés orge, pomme de terre et fève. Ce type de sol et les activités qui y sont associées sont surtout présents dans le bassin de Guayllabamba.

Dans le bassin de Pastaza, la répartition des sols montre une variante importante dans l'étage compris entre 3 200 et 3 500 m d'altitude, où les sols dominants sont les andosols vitriques (Vitrudands). D'épaisseur moyenne (de l'ordre de 0,50 m), ils sont moins évolués que les précédents (climat plus sec, substrat plus jeune proche des volcans). Ils ont une couleur claire et sont pauvres en matière organique et sans structure. Ils sont néanmoins aussi fortement anthropisés par le minifundio que dans le bassin de Guayllabamba.

Compte tenu de la forte emprise du minifundio sur les andosols désaturés hydratés et sur les andosols vitriques, entre 3 200 et 3 500 m, deux sites de station correspondant à ces situations ont été choisis : Mojanda, dans le bassin de Guayllabamba et Riobamba, dans le bassin de Pastaza.

La station de Mojanda est placée sur le versant oriental du volcan Mojanda, à mi-chemin entre le pied du versant et le sommet de cet édifice. Le modelé, qui résulte de la superposition de plusieurs dizaines de mètres de pyroclastites (cendres noires fines avec quelques intercalations de pierres ponce), est relativement régulier dans son ensemble. La station de mesure a été installée à 3 300 m, sur un versant de 40 % de pente (cf. fig. 11).

La station de Mojanda



- ▣ Édifices volcaniques de Mojanda et Ilalo (andésites, cendres, brèches)
- Pyroclastites récentes
- ▣ Dépôts de remplissage + cendres + lahars
- Andosol induré (cangahua)

FIG. 11 — Coupe dans le bassin de Quito, où sont situées les stations de Tumbaco, Cangahua et Mojanda

² Test mis au point en Nouvelle-Zélande par Fieldes et Perott (1966). Au contact de cette solution, l'agrégat de sol vire au rose s'il contient de l'allophane.

³ Centième de mole par kg, ce qui correspond au milliéquivalent pour 100 g de sol sec, qui est l'autre mode d'expression en usage pour évaluer la capacité d'échange.

Les sols sont des andosols hydratés désaturés de 0,5 à 0,8 m d'épaisseur (tabl. VI). Ils sont caractérisés par la superposition d'un horizon organique noir, limono-argileux et friable, de structure fine surtout visible sur les deux premiers centimètres après déshydratation, et d'un horizon plus clair, gris sombre à l'état sec et plus argileux. Ces deux horizons sont poreux et remarquablement prospectés par les racines, ils présentent une réaction au fluorure de sodium (DUCHAUFOR, 1995)² qui traduit la présence d'un complexe organo-minéral, généralement riche en allophanes lorsque le substrat est d'origine volcanique. Au-delà de 0,5-0,6 m, on passe progressivement à une cendre grise renfermant quelques éléments de ponce millimétrique peu altérés. Ces sols sont faiblement acides et désaturés, avec une capacité d'échange proche³ de 20 cmol kg⁻¹. Le calcium est dominant, le potassium et le magnésium sont présents et la carence en phosphore est manifeste, celui qui existe ayant une forme inassimilable (cf. tabl. VI).

De par l'altitude, le climat de la station de Mojanda est relativement froid. Les températures moyennes annuelles sont inférieures à 12 °C,

avec des maximales ne dépassant guère 20 °C. Les gelées sont fréquentes pendant les 2 saisons sèches (de juin à août et de décembre à janvier) et chaque fois que le ciel reste dégagé plus d'une semaine. Les hauteurs moyennes de pluies augmentent globalement avec l'altitude, à la station elles atteignent 900 mm par an. Les chutes de grêle sont assez fréquentes.

La région de Mojanda est située en plein minifundio récent. Au cours des trois décennies passées, le paysage s'est fortement modifié, passant du paysage ouvert lié aux grandes haciendas au minifundio bocager. Actuellement, l'utilisation, de plus en plus courante, du tracteur tend à faire disparaître les aménagements précédents qui, bien que n'étant pas prévus à l'origine pour la lutte anti-érosive, permettaient de dissiper une grande partie de l'énergie du ruissellement. Dans ce milieu, les paysans cultivent l'orge, la pomme de terre et la fève, et pratiquent un pâturage extensif.

En raison de la longueur des cycles cultureux due au froid et à l'absence d'une véritable saison sèche dans l'année, le calendrier cultural est d'une grande souplesse et il n'est pas rare de voir, à la même époque, des champs d'orge à tous les stades de maturité. Cela explique que les parcelles et les sols puissent rester nus à n'importe quel moment, ce qui augmente d'autant les risques d'érosion.

Le site de Riobamba est localisé sous le vent du grand volcan Chimborazo (6 310 m), précisément sur le tiers inférieur du versant méridional de cet édifice, à 3 250 m d'altitude (cf. coupe de la fig. 10). Le versant présente un profil rectiligne et régulier, à forte pente (35 % à la station).

La station de Riobamba

Sur 1 m d'épaisseur environ, le versant porte des pyroclastites sablonneuses auxquelles succède en profondeur un matériau plus hétérogène, composé de gros blocs pris dans une matrice fine, d'origine vraisemblablement morainique. Sur ces formations s'est développé un andosol vitrique. Celui-ci se caractérise par une faible différenciation des horizons : au sommet existe un horizon gris, épais de 0,15 à 0,20 m, faiblement humifère, à peine structuré, riche en restes végétaux mal décomposés et non incorporés à la matière minérale. En dessous se trouve un horizon un peu plus sombre, pauvre en matière organique, d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur. La réaction au fluorure de sodium est faible et tardive, ce qui traduit une faible quantité d'allophane. La texture est à dominante de limons et de sables fins, à caractère battant (cf. tabl. VI).



Station de mesure de l'érosion de Riobamba, à 3 250 m d'altitude. La photo est centrée sur la grande parcelle expérimentale de ruissellement qui porte des bandes enherbées isohypses ; sur le côté droit apparaît partiellement l'une des petites parcelles expérimentales. La pente générale de la station est de 35 %. Les projections volcaniques sont importantes car le volcan Chimborazo est tout proche ; les sols qui en dérivent sont des andosols vitriques.

Sur ce versant, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 700 mm, sans mois suffisamment sec pour avoir une incidence sur les cultures. Les précipitations les plus fortes ont lieu en octobre puis en mars-avril, la saison humide se caractérisant par la présence de longues périodes de brouillard et de crachin. Les températures moyennes annuelles sont légèrement supérieures à 10 °C, sans que les maximales ne dépassent 20 °C. Comme à Mojanda, le risque de gelée, qui peut intervenir à n'importe quel moment de l'année, est fort, particulièrement entre juin et août et de décembre à janvier, ce qui coïncide avec les deux saisons sèches. Le versant aménagé par le minifundio porte des cultures de pomme de terre, d'orge et de fève, avec quelques parcelles d'oignons. Les calendriers culturels ne suivent pas de règle précise et sont très

contraignants pour les sols : la jachère n'est pas pratiquée et les cultures se succèdent dans le temps sans véritable période de repos pour le sol.

Sur le site du versant et à proximité de la station, les parcelles cultivées révèlent de nombreuses griffes d'érosion d'échelle centimétrique ainsi que des atterrissements sableux décimétriques au bas des parcelles. En bordure de certains champs délimités par des haies vives, le vent, actif durant la saison sèche estivale, a favorisé la formation de petites accumulations sableuses d'échelle centimétrique et décimétrique.

La dépression s'étend entre 2 500 et 3 000 m d'altitude. Elle forme un long couloir logé entre les deux cordillères dont la largeur maximale n'excède pas 40 km. Elle est constituée par une enfilade de bassins d'effondrement (SAUER, 1965) où se sont accumulés d'importants dépôts pyroclastiques. Sa topographie est évidemment moins accidentée que celle des cordillères. Quelques bassins comme celui de Quito et de Latacunga présentent de larges fonds plats (cf. cartes 3 et 15).

Abritée par les cordillères, la dépression n'est que moyennement arrosée, avec des précipitations de l'ordre de 500 à 800 mm an⁻¹, réparties en deux saisons (de février à mai et de septembre à novembre). Dans quelques secteurs de bassins en situation déprimée (< 2 000 m) et vallées basses, les pluies sont inférieures à 500 mm an⁻¹.

Les sols de la dépression, utilisés pour la culture du maïs par le minifundio et pour l'élevage par les haciendas, sont des andosols, comme dans la cordillère, mais ils sont moins riches en allophanes et montrent une moindre altération des pyroclastites (coupe de la fig. 9). Ce sont :

- des sols molliques (Hapludolls et Argiudolls). Moyennement profonds, de l'ordre de 0,80 m, de couleur brun sombre, ils sont bien pourvus en matière organique, en argiles de type montmorillonites, ce qui leur confère une bonne structure. Ils portent essentiellement des pâturages et ne montrent pas de signe évident d'érosion ;
- des andosols vitriques (Vitrudands) identiques à ceux observés sur les cordillères. En règle générale, ces sols sont insuffisamment protégés par une végétation rare, fragile et à faible vitesse de croissance. Ils sont particulièrement sensibles à la surexploitation, voire au pâturage par les caprins, qui favorisent le déclenchement du ruissellement concentré ;
- des andosols à horizons indurés (Durudands, Durustands). Ces sols peu évolués et peu profonds, et qui témoignent d'une érosion active,

La dépression pyroclastique

Les sols et leur environnement

MOJANDA	%			cmol kg ⁻¹						%	‰	%					pH	
	C tot	N tot	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	P ₂ O ₅	A	Lf	Lg	Sf	Sg	eau	KCl
Hors Parcelle	3,5	0,3	14,0	7,0	1,0	0,4	tr.	8,4	16,9	50	0,2	14,8	23,9	15,7	24,0	13,5	5,8	4,9
Parcelle améliorée	3,2	0,2	14,0	6,3	0,9	0,4	tr.	7,7	19,4	39	0,2	14,5	26,7	15,7	25,6	12,6	5,6	4,8
Parcelle témoin cultivée	3,2	0,2	15,3	4,6	0,7	0,1	tr.	5,7	15,6	37	0,2	14,5	28,6	15,6	25,6	12,2	5,4	4,7
Parcelle témoin non cultivée	2,9	0,1	22,7	5,9	0,8	0,3	tr.	7,1	15,0	47	0,2	14,0	26,5	14,9	26,8	13,4	5,6	4,8
RIOBAMBA																		
Hors Parcelle	1,6	0,1	13,8	4,2	0,8	0,2	tr.	5,2	8,0	65	0,09	1,9	16,7	17,7	41,0	20,7	6,5	5,5
Parcelle améliorée	1,7	0,1	13,5	4,9	1,0	0,3	tr.	6,2	8,6	72	0,09	2,1	16,1	18,4	40,3	20,9	6,6	5,6
Parcelle témoin cultivée	1,5	0,1	13,8	6,0	0,7	0,1	tr.	7,0	10,4	68	0,09	3,9	18,3	17,1	39,2	20,1	6,6	5,6
Parcelle témoin non cultivée	1,4	0,1	12,4	4,8	1,0	0,1	tr.	6,0	8,4	72	0,09	2,1	16,0	17,4	41,8	21,0	6,4	5,5

Tabl. VI — Analyse des sols des stations de Mojanda et Riobamba

TUMBACO	%			cmol kg ⁻¹						%	‰	%					pH	
	C tot	N tot	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	P ₂ O ₅	A	Lf	Lg	Sf	Sg	eau	KCl
Hors Parcelle	1,5	0,13	12,3	12,3	6,4	1,07	tr.	19,8	20,4	97	0,14	23,3	22,5	15,3	25,9	6,3	7,4	6,3
Parcelle améliorée	1,3	0,13	10,7	10,7	8,9	1,1	tr.	20,7	19,5	*	0,14	24,3	21,7	15,2	28,4	6,7	6,5	5,8
Parcelle témoin cultivée	0,7	0,08	8,9	11,5	9,6	1,02	tr.	22,1	21,5	*	0,11	18,2	28,0	16,3	27,7	5,6	7,3	6,3
Parcelle témoin non cultivée	0,7	0,08	9,4	17,0	8,7	1,12	tr.	26,8	20,6	*	0,14	17,0	26,9	17,3	28,4	6,0	7,5	6,5
CANGAHUA																		
Hors Parcelle	1,4	0,13	11,6	7,7	5,1	0,74	tr.	13,5	16,0	84	[-]	11,2	17,4	13,1	38,0	15,6	7,4	6,3
Parcelle améliorée	1,6	0,1	11,8	9,4	8,3	0,65	tr.	18,4	31,1	59	0,20	14,7	15,9	12,7	39,7	15,2	6,4	5,8
Parcelle témoin cultivée	1,6	0,13	12,1	10,2	9,2	0,70	tr.	20,2	34,1	59	0,15	12,2	13,8	4,4	37,6	29,6	7,2	6,7
Parcelle témoin non cultivée	1,7	0,14	11,8	9,7	9,0	0,77	tr.	19,6	17,7	100	0,16	13,9	14,6	13,4	40,5	15,8	6,7	6,1

* résultats supérieurs à 100

Tabl. VII — Analyse des sols des stations de Tumbaco et Cangahua

JADAN	%			cmol kg ⁻¹						%	‰	%					pH	
	C tot	N tot	C/N	Ca	Mg	K	Na	S	T	V	P ₂ O ₅	A	Lf	Lg	Sf	Sg	eau	KCl
Hors Parcelle	1,2	0,2	7,3	20,5	8,5	0,3	tr.	29,3	30,0	98	0,15	26,8	25,0	2,6	1,0	44,1	7,1	5,8
Parcelle améliorée	0,9	0,2	5,4	14,4	5,6	0,1	tr.	20,1	28,0	72	0,18	23,3	27,8	3,8	1,3	38,3	7,1	5,9
Parcelle témoin cultivée	0,7	0,2	4,7	10,9	4,8	0,1	tr.	15,8	29,0	54	0,16	28,2	28,7	3,2	1,4	34,6	7,1	5,6
Parcelle témoin non cultivée	0,7	0,2	4,5	24,2	9,0	0,1	tr.	33,3	21,2	100	0,12	26,8	31,9	3,6	1,5	34,6	7,1	5,5
VEGA GRANDE																		
Parcelle améliorée	2,5	0,2	11,6	29,4	5,3	0,4	0,7	35,1	45,8	77	0,09	31,0	34,1	12,3	12,7	6,8	6,3	5,3
Parcelle témoin cultivée	2,5	0,2	9,5	26,9	6,6	0,2	1,2	33,7	42,2	80	0,15	23,2	28,3	14,0	15,2	13,6	6,5	5,1
VENTANAS																		
Hors Parcelle	2,8	0,3	9,5	10,5	2,1	0,9	tr.	13,5	16,2	85	0,45	20,0	36,6	21,0	10,6	10,1	6,1	5,4
Parcelle améliorée	2,7	0,3	9,5	9,8	1,8	0,7	tr.	12,3	23,6	52	0,43	18,8	34,8	22,5	11,5	11,2	6,1	5,4
Parcelle témoin cultivée	2,8	0,3	9,9	12,0	2,1	0,8	tr.	14,9	25,0	54	0,67	21,0	34,7	21,8	10,3	9,7	6,2	5,8
Parcelle témoin non cultivée	2,7	0,3	9,7	13,5	2,5	0,9	tr.	16,9	26,6	70	0,68	21,2	33,5	22,9	10,1	8,7	6,4	5,5

Tabl. VIII — Analyse des sols des stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas

⁴ Ce type d'horizon est également présent dans le bassin versant de Pastaza. La mesure du ruissellement et de l'érosion sur les stations nécessite un suivi très rigoureux et régulier. Or, plus un site est éloigné, plus le rythme régulier des visites est difficile à maintenir, et plus les risques d'erreurs sont élevés. Choisir des sites dans le bassin versant de Guayllabamba, plus facile d'accès depuis notre base de Quito, a été préféré dans la mesure où s'y trouvaient des situations représentatives.

La station de Tumbaco

couvrent des surfaces importantes. Ils résultent du décapage des sols molliques et des andosols vitriques et montrent un mince horizon meuble de surface, de 0,20 à 0,30 m d'épaisseur, situé sur les horizons indurés appelés « cangahua » (CUSTODE *et al.*, 1992). Ces derniers affleurent assez largement en raison de l'érosion qui a fait disparaître l'horizon de surface.

Étant donné l'importance de cette formation, deux stations où la cangahua⁴ est bien représentée ont été retenues dans la dépression : l'une à Tumbaco et l'autre à Cangahua, toutes deux situées dans le bassin de Guayllabamba.

La station de Tumbaco se situe à une trentaine de kilomètres à l'est de Quito, au lieu-dit « La Tola », à 2 600 m d'altitude. La pente moyenne est de 20 %. La coupe de la fig. 11 montre sa situation précise au pied du versant sud du volcan Ilalo. Dans cette région, les formations du fond de la dépression portent des pyroclastites récentes situées au-dessus de la cangahua. Lorsque les pyroclastites sont érodées, la cangahua affleure. L'effervescence à l'acide du sol et de la cangahua est due à la présence de calcaire actif. Le calcium et parfois le magnésium et le potassium sont des éléments dominants. Le sol a une capacité d'échange supérieure à 20 cmol kg⁻¹ et un pH neutre ou légèrement alcalin (cf. tabl. VII).

Le sol est un andosol mollique tronqué, où l'horizon argileux a disparu par fluage sur la cangahua. Ce schéma est classique dans cette zone car les sols de ce type présentent une forte susceptibilité au mouvement en masse. À terme, seul subsiste donc l'horizon sablo-limoneux qui sert de support aux cultures et qui n'offre guère de résistance au ruissellement concentré. En raison de sa faible profondeur, de 0,30 à 0,40 m d'épaisseur au-dessus de la cangahua, les incisions ne dépassent pas la taille des griffures et des rigoles d'échelle centimétrique. L'évolution tend naturellement vers un décapage généralisé de la cangahua. Ce phénomène est moins visible sur les parcelles cultivées : les agriculteurs fragmentent et pulvérisent la cangahua et l'incorporent au sol lorsque ce dernier atteint une épaisseur inférieure à 0,20 m. Hors des parcelles de cultures, par étapes successives, de larges surfaces de cangahua, d'échelle hectométrique sont décapées. Bien que l'érosion concentrée soit peu active sur cette formation, ces secteurs posent un problème important en raison de la faible perméabilité et de la forte induration qui la caractérisent.

Si la cangahua est une surface peu érodible, elle est en revanche très ruisselante. Le ruissellement, essentiellement diffus, y transporte des quantités d'eau importantes qui sont transférées dans les zones plus

basses. Ces reports hydriques sont fréquemment à l'origine d'une reprise de l'érosion concentrée, particulièrement néfaste dans les sols arables situés à l'aval.

Le climat est rythmé par l'alternance dans l'année de deux saisons humides et de deux saisons sèches. Les moyennes des précipitations sont de l'ordre de 700 mm. La saison sèche est accompagnée de vents chauds et secs, de type fœhn, qui soufflent de 11 heures à 17 heures en provoquant une déshydratation accélérée des sols et de la végétation. La température moyenne annuelle de 17 °C traduit une moyenne des minimales de 10 °C et une moyenne des maximales de 25 °C.



Après le choix des sites des stations, l'installation pratique des parcelles de ruissellement, la démarche participative se poursuit par le travail du sol afin de préparer le lit de semence. Ici, les paysans de la commune de Chuspiaco travaillent le sol de l'une des parcelles expérimentales de la station de Tumbaco en utilisant le traditionnel *asadon*. Le travail est assez pénible, car la cangahua indurée se trouve à faible profondeur et il est parfois nécessaire de pulvériser les gros blocs qui se trouvent en surface.

Le site est habité par des communautés indigènes, organisées en minifundio, qui cultivent essentiellement le maïs sur de toutes petites propriétés au parcellaire éclaté. Sur les zones d'affleurement de la cangahua associée à des placages résiduels de sol d'échelle décimétrique, des eucalyptus ont été plantés pour lutter contre les reprints hydriques. Mais cette protection s'avère insuffisante et l'érosion des placages de sol associée à l'action du ruissellement diffus sur la cangahua continuent à se manifester. En comparaison, les secteurs colonisés par le développement spontané de la prairie à *kikuyu* (*Penisetum clandestinum*) dissipent plus efficacement l'action du ruissellement.

La station de Cangahua

Elle est localisée face au volcan Mojanda, au pied des premières pentes qui constituent les versants internes de la cordillère orientale. La coupe de la fig. 11 montre que la station se situe un peu au-dessus de la zone de glacis-terrace évoquée précédemment, à 2 800 m d'altitude sur une pente de l'ordre de 18 %.

Ce site porte bien son nom, car les pyroclastites récentes ont disparu par érosion et la cangahua affleure largement. Ce site est plus dégradé encore que celui de Tumbaco, il n'y a plus guère de dépôt ni de sol sur la cangahua. Malgré cela, les paysans qui n'ont pas émigré utilisent certaines techniques pour travailler la cangahua, non cultivable dans son état induré. Pour y parvenir, ils la défoncent, la pulvérisent pour la rendre meuble et ajoutent un amendement à base de fiente de poulet et de sciure de bois. Le sol du site est donc le résultat de différentes opérations anthropiques. Compte tenu de la difficulté de ce travail, les paysans cherchent à atteindre une épaisseur minimale pour le labour, de l'ordre 0,2 à 0,3 m. Le matériau obtenu est très fin, d'aspect farineux, riche en sables fins et en limons ; son pH proche de 7 (cf. tabl. VII). Il est remarquablement susceptible à l'érosion. Dans les zones non reprises pour la culture, les surfaces de cangahua constituent comme à Tumbaco un réel danger pour les secteurs situés plus bas, en raison des reprints hydriques qu'elles favorisent.

Le climat présente les mêmes caractéristiques qu'à Tumbaco. Le site de Cangahua est un peu moins arrosé (550 mm par an) en raison de sa position sous le vent de la cordillère orientale. Durant les mois de juin, juillet et août, sous l'action des vents secs et chauds alors que l'insolation est maximale, le sol ne dispose pas d'une humidité suffisante pour permettre les cultures annuelles. Une année sur trois, ce phénomène intervient également en décembre et janvier, lorsque la petite saison sèche se prolonge ou lorsque les pluies précédant cette période ont été faibles.

Un minifundio ancien, constitué de cultures de subsistance où prédomine le maïs associé à la fève et au haricot grim pant, occupe le secteur. La végétation commune est le pâturage à *kikuyu*, les bois d'eucalyptus et les arbustes épineux (*chilca*). En règle générale, la végétation protège peu le sol, le taux de couverture est faible en raison de la faible pluviométrie, de l'action du bétail et des besoins humains en bois d'œuvre et de chauffage.

Comme l'ensemble de la Sierra, la Sierra méridionale est composée de deux ensembles topographiques principaux : les cordillères et la dépression. Les principales différences résident dans la baisse générale des altitudes et l'absence de formations volcaniques récentes.

De manière générale, les lignes de crêtes sont moins élevées : dans la région de Cuenca, les sommets ne dépassent guère 3 500-4 000 m et ils atteignent à peine 3 000 m dans la région de Loja (coupe de la fig. 12). Les pentes des versants présentent également des valeurs élevées (> 40%) et les précipitations sont comprises entre 1 500 et 2 000 mm par an. La répartition des sols est la suivante :

Les bassins versants cristallins et sédimentaires de Santiago et Catamayo

Les cordillères du socle

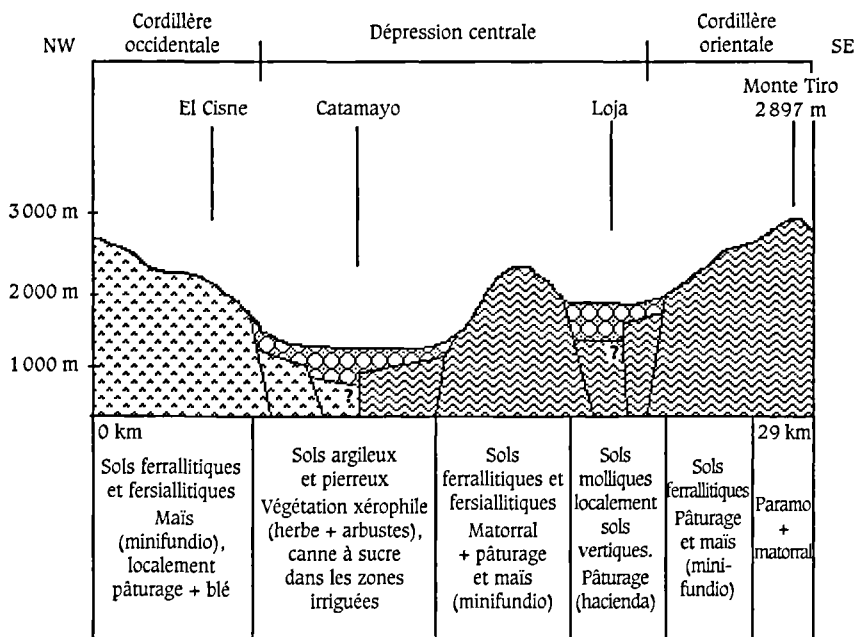


Fig. 12 — Coupe de cordillère à cordillère traversant les bassins de Catamayo et de Loja

- ☒ Socle métamorphique de la cordillère orientale
- ☒ Socle volcano-sédimentaire de la cordillère occidentale
- ☒ Dépôts de remplissage de bassin (argiles, sables, conglomérats)

- en zone humide, sur les hautes terres et les versants externes, tant à l'ouest qu'à l'est, le processus de ferrallitisation est général. Sur les pentes les plus fortes (40-70 %), des rankers d'érosion (Orthents) sont associés à des sols ferrallitiques humifères d'altitude peu épais (Dystropepts). Ces sols semblent bien résister à l'érosion grâce à la couverture naturelle, homogène et dense prodiguée par le chaparral, équivalent du matorral que l'on trouve au Nord ;
- en zone plus sèche, mieux abritée des pénétrations océaniques, sur les versants internes des cordillères (2 500-3 000 m), on trouve des sols érodés peu évolués (Orthents), associés à des sols ferrallitiques. Plus bas, on passe à des sols fersiallitiques qui portent des marques parfois importantes d'érosion en liaison avec l'extension du minifundio (cf. carte 4).

La dépression sédimentaire

La dépression révèle également un abaissement progressif des altitudes, comprises du nord au sud entre 2 600-2 800 m et 1 500 m, ainsi qu'une largeur plus faible, inférieure à 10-15 km. Les deux bassins principaux, Cuenca et Loja, sont remplis de dépôts détritiques très épais (argiles, sables, conglomérats), faisant place ponctuellement à des roches plus résistantes (argilites, grès) disposées en reliefs monoclinaux. Les totaux annuels de précipitations sont compris entre 500 et 800 mm par an et descendent à moins de 500 mm par an dans les vallées les plus basses.

Les sols sont organisés selon deux types d'associations (fig. 12 et 13) :

- d'une part, les sols ferrallitiques et fersiallitiques, qui se trouvent sur les hauts versants et les glaciers sablo-caillouteux disséqués ;
- d'autre part, les sols molliques et les sols vertiques (Argiustolls, Ustrophepts), qui occupent les fonds de bassins et les versants périphériques. Dans l'ensemble, ils renferment une charge caillouteuse importante. L'essentiel des activités agricoles se situe sur ces sols : les haciendas se sont développées sur les secteurs les plus plans, où les risques d'érosion sont très faibles et le minifundio s'est étendu sur les versants bas et moyen, où on relève des manifestations actives de ruissellement diffus relayé par le ruissellement concentré. Dans les secteurs de défrichement les plus anciens, l'évolution des versants a conduit à un ravinement généralisé de type bad-lands (cf. fig. 4)

Par comparaison avec la Sierra du Nord et du Centre, les zones aménagées de la Sierra méridionale affectées par l'érosion accélérée sont réparties de manière plus lâche. Outre les facteurs du milieu physique qui peuvent expliquer cette différence, un autre facteur possible tient aux densités

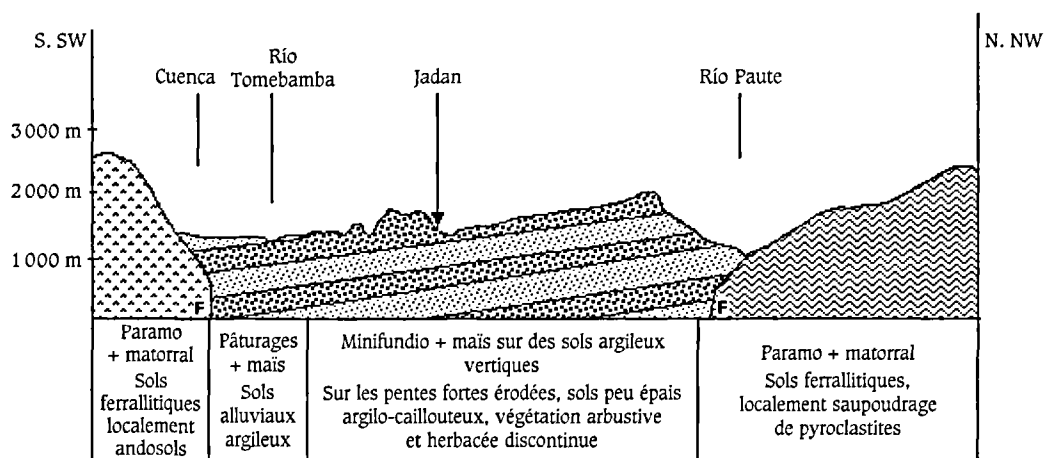
de population : elles sont inférieures à 50 habitants par km² et plus faibles que dans la Sierra volcanique du Nord (DELAUNAY, 1989).

Le choix des stations s'est porté sur les versants moyens et bas de la dépression méridionale, là où la population est la plus nombreuse et l'érosion par ruissellement la plus active. Deux stations ont été retenues sur la base de ces critères : l'une à Jadan, dans le bassin versant de Santiago, et l'autre à Vega Grande, dans le bassin versant de Catamayo.

Jadan se situe au nord-est du bassin de Cuenca, sur la rive gauche de la rivière Paute, qui draine le principal sous-bassin du bassin de Santiago. L'État équatorien a installé un énorme barrage hydroélectrique sur le Paute qui représente la principale source d'électricité du pays. Ce barrage enregistre une sédimentation croissante qui traduit une érosion importante dans la zone d'impluvium où se situe précisément la station de Jadan.

La station de Jadan

La situation du site est indiquée sur la coupe de la figure 13. La coupe traverse le bassin de Cuenca selon une direction NNW-SSW. Ce secteur possède les principales caractéristiques qui distinguent la Sierra méridionale du reste de la Sierra : des sols autres que les andosols, en raison de l'absence de pyroclastites récentes, un relief plus modeste, caractérisé par une dépression de faible largeur et des cordillères dont l'altitude est toujours inférieure à 4000 m. Sur le site, la station est installée sur le versant occidental d'un relief résiduel culminant à 2900 m et développé



- Socle volcano-sédimentaire de la cordillère occidentale
- Socle métamorphique de la cordillère orientale
- Roches sédimentaires détritiques (argilites localement métamorphisées, sables, intercalations volcaniques)
- Faille présumée

FIG. 13 — Coupe du site de la station de Jadan, dans le bassin de Cuenca

dans les dépôts détritiques du bassin (argilites métamorphisées, argiles et sables) qui ont été basculés selon un pendage vers le SW.

La station proprement dite est située à 2 700 m d'altitude sur un versant d'argilites, à faciès de schistes peu résistants. La pente générale est de l'ordre de 22 %. Les sols, peu épais dans l'ensemble (de 0,20 à 0,40 m), sont des rankers d'érosion, caractérisés par la présence d'un mince horizon brun sablo-limono-argileux (0-0,10 m) renfermant jusqu'à 30 % d'éléments caillouteux centimétriques ; lui succède un horizon clair, très riche en fragments d'argilites schisteuses mêlées à une terre fine limono-argileuse (cf. tabl. VIII). Les altérites, épaisses d'une vingtaine de centimètres, sont présentes à faible profondeur, entre 0,40 et 0,60 m, puis apparaissent les argilites faiblement désagrégées. Les orages violents provoquent un fort ruissellement concentré, caractérisé par un chevelu



Campagne de simulation de pluies sur la station de Jadan, dans la dépression sédimentaire de la Sierra méridionale (2 700 m d'altitude, 22 % de pente). Dans le cadre d'une démarche participative globale, les paysans sont également invités à suivre ce type de technique. La participation est bonne en général, car cette technique est un outil de démonstration et de vulgarisation apprécié. Elle permet de simuler rapidement les grands principes de l'érosion due à l'eau de pluie et de montrer l'impact de l'homme sur le sol et l'intensité des processus.

dense de rigoles d'échelle centimétrique. On note par endroits la présence de ravines d'échelle décimétrique, incisant le sol jusqu'au substrat. Une zone totalement ravinée en bad-lands, d'échelle hectométrique, est également présente sur le site.

Le climat est de rythme équatorial et présente deux saisons humides et deux saisons sèches. La pluviométrie, de l'ordre de 700 mm par an, est identique à celle du site de Tumbaco. Le site est occupé par le minifundio organisé en champs de petite taille (moins de 5 ha). La possibilité d'irrigation a favorisé une utilisation diversifiée de l'espace agricole et des productions qui associent :

- la canne à sucre et les légumes produits à proximité et en contrebas du site, dans la zone alluviale ;
- un élevage extensif, sur le sommet du versant où existent des secteurs érodés sans sol ;
- le maïs, cultivé sur les versants dans les secteurs où l'épaisseur du sol est encore suffisante.

La station est située sur la rive occidentale de la rivière Catamayo, sur un versant de 25 % de pente et de faible altitude (1 500 m). Il est représentatif de la topographie de cette partie de la Sierra où les altitudes sont les plus basses. La coupe de la figure 14, qui traverse la vallée de la rivière Playas puis le petit bassin de Catamayo, illustre cet aspect : les points bas sont inférieurs à 2 000 m, voire localement à 1 500 m, quant aux points les plus hauts, ils avoisinent 3 000 m d'altitude. Le versant s'est formé sur le vieux complexe volcanique qui constitue le socle de la cordillère occidentale. En raison d'une pluviométrie annuelle faible, les altérites sont peu épaisses, de l'ordre de 0,20 à 0,3 m. Sur le site, elles sont remaniées et forment des dépôts colluviaux de 0,60 à 0,80 m d'épaisseur. Le sol développé sur ce matériau est un sol vertique, peu épais (0,20 à 0,30 m d'épaisseur) et de texture argileuse. Il présente de nombreux éléments grossiers de toutes tailles, une structure finement grenue, de couleur brun rouge, avec des fentes en surface qui se poursuivent dans le profil selon des directions verticales ou obliques.

Le pH est faiblement acide, la capacité d'échange supérieure à 40 cmol kg⁻¹ et le taux de matière organique supérieur à 4 % (cf. tabl. VIII). Ces sols sont associés dans le paysage à des zones dénudées qui évoluent progressivement en bad-lands.

En raison de son altitude assez basse, le climat du site est chaud (25 °C pour les moyennes mensuelles). Les totaux pluviométriques sont de l'ordre de 600 mm en moyenne par an.

La station de Vega Grande

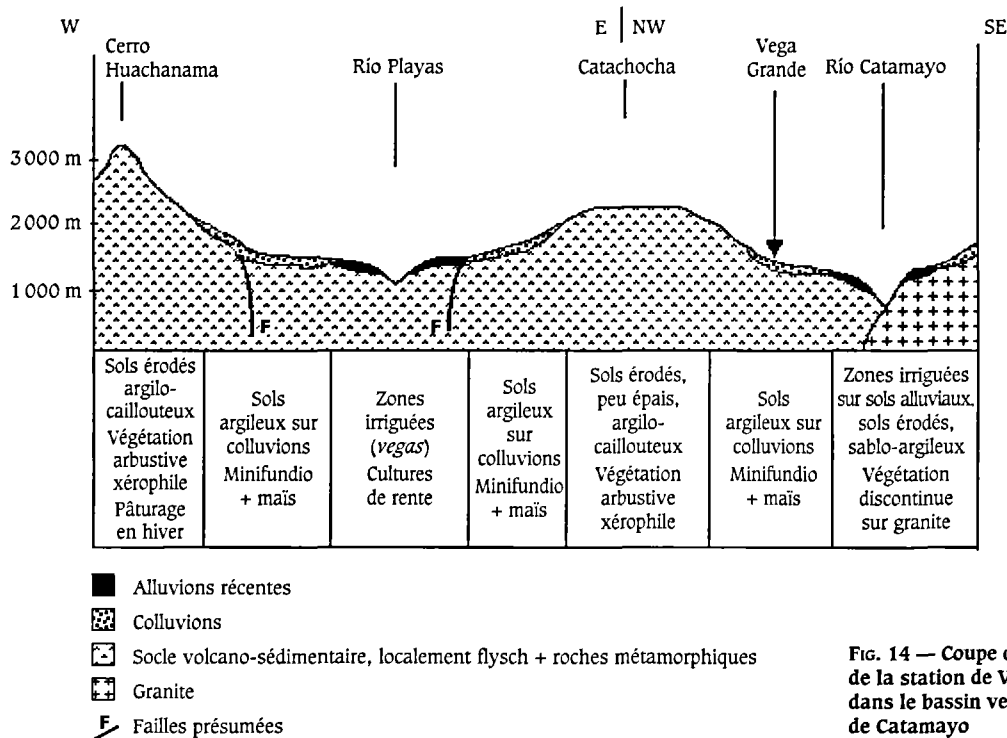


FIG. 14 — Coupe du site de la station de Vega Grande, dans le bassin versant de Catamayo

Les versants du type de celui de Vega Grande sont dédiés à la culture du maïs et sont occupés par un parcellaire en petits damiers caractéristiques du minifundio. Ici aussi, l'introduction du tracteur fait reculer le bocage, facilitant ainsi l'action du ruissellement concentré, dynamique dominante sur les versants aménagés. Des cultures de rente, la canne à sucre en particulier, se trouvent dans les zones alluviales irriguées (les « Vegas » signalées sur la coupe de la fig. 14).

Le bassin versant de Guayas

Une station de piedmont

À des fins comparatives, une station a été choisie à l'extérieur de la Sierra, dans une zone du piedmont côtier du grand bassin de Guayas. Bien que soumise à des conditions typiquement tropicales, une zone comme celle-ci est très liée d'un point de vue humain à la Sierra d'où sont partis les fronts pionniers agricoles qui l'ont peuplée. Les défrichements dans ce secteur sont anciens et à l'origine d'une érosion agricole importante. Les hydrologues équatoriens ont mesuré dans deux des sous-bassins du bassin versant de Guayas, Chanchan et Chimbo, des pertes en terre comprises entre 1 000 et 3 000 t km⁻² an⁻¹.

La station se situe à une latitude proche de celle de Riobamba, mais une dénivellation de plus de 3 000 m sépare ces deux sites, comme le montre la coupe de la figure 10. Ventanas se trouve sur un ancien cône de déjection entaillé par un réseau de vallées à fond plat, sans écoulement en saison sèche et marécageuses en saison humide. Ce cône est modelé en larges collines, de 30 à 40 m de haut, avec en surface quelques placages fins de cendres, émis certainement par le Chimborazo et épargnés par l'érosion. La station de mesure proprement dite est installée à 220 m d'altitude sur le versant convexe de l'une des collines dont la pente est de 20 %.

Le climat est tropical chaud avec des pluies moyennes annuelles de l'ordre de 1 800 mm, bien plus importantes donc que sur toutes les autres stations de la Sierra. Ces pluies débutent fin décembre et atteignent un maximum entre janvier et avril inclus, puis elles décroissent rapidement en mai-juin et sont minimales de juillet à novembre. Les températures moyennes annuelles sont de 25 °C avec de faibles différences inter-mensuelles (4 °C).

Les sols sont vertiques et développés à partir des dépôts constitutifs des cônes de déjection. Les matériaux sont très altérés sur une dizaine de mètres et très argileux. Il est impossible d'identifier les matériaux d'origine, si ce n'est la présence par endroits de quelques galets fantômes. De couleur brun sombre, les sols sont bien pourvus en matière organique, très riches en limons (50 %) et en argiles (20 %) et saturés à 50 %. Les bases échangeables sont : le calcium, 10 cmol kg⁻¹ ; le magnésium, 2 cmol kg⁻¹ et le potassium, près de 1 cmol kg⁻¹. La réaction est faiblement acide : pH un peu supérieur à 6 (cf. tabl. VIII).

Ces sols présentent en surface des fentes de retrait typiques des sols vertiques et montrent des agrégats polyédriques et grumeleux moyens jusqu'à 0,10-0,15 m de profondeur. Puis vient progressivement un horizon brun puis beige de 0,50 m d'épaisseur, caractérisé par une structure polyédrique grossière à surstructure en gros prismes et à forte macroporosité de saison sèche. Enfin un matériau argileux, de couleur beige à gris brun, laisse entrevoir quelques tâches d'hydromorphie et des billes noires millimétriques.

Le site se trouve dans le domaine de grandes cultures mécanisées (bananes, riz irrigué, soja) soumises aux prix des marchés internationaux. Il existe également une petite agriculture qui dégage de faibles excédents. Cette dernière, essentiellement de subsistance, est surtout développée sur les versants des collines et produit du maïs et du riz pluvial. Comme dans la Sierra, l'érosion accélérée des sols progresse et fait chuter la

fertilité des sols. Le ruissellement concentré est la dynamique dominante. Le chevelu de rigoles est dense en général, il laisse voir des ravines de 0,50 m de profondeur.

Dans le tableau IX sont récapitulées les principales caractéristiques des stations choisies.

		Érosion	Sites Pentes	Altitude Pluie	Cultures	Sols	
SIERRA VOLCANIQUE NORD ET CENTRE	Bassin versant Guayllabamba Pyroclastites sablo-ponceuses à argilo-limoneuses (1 à 3 m d'épaisseur sur la cangahua)	DÉPRESSION érosion très généralisée	Cangahua à faible profondeur Mouvement de masse relayé par érosion concentrée	Tumbaco 20 %	2 600 m 700 mm	Maïs + eucalyptus	Sol mollique tronqué, (l'horizon argileux a disparu) 0,3 à 0,4 m d'épaisseur, reposant sur la cangahua
				Cangahua 18 %	2 800 m 550 mm	Maïs + fève + haricot	Andosol induré. Les paysans pulvérisent la cangahua pour cultiver, épaisseur minimale pour le labour 0,2 à 0,3 m
	Bassin versant Pastaza Pyroclastites sables > 3 200 m sans cangahua	CORDILLÈRES érosion lâche sans cangahua	Érosion concentrée localement mouvement de masse	Mojanda 40 %	3 300 m 900 mm	Orge + pomme de terre + fève	Andosol hydraté saturé, 0,5 à 0,8 m d'épaisseur, en profondeur, cendres noires argilo-limoneuses très épaisses
			Érosion concentrée localement érosion éolienne	Riobamba 35 %	3 250 m 700 mm	Orge + pomme de terre + oignons	Andosol vitrique, 0,3 à 0,58 m d'épaisseur, sables fins (1 m) sur matériau morainique
SIERRA SUD SANS PYROCLASTITE	Bassin versant Santiago Dépôts sédimentaires argiles, sables cong.	DÉPRESSION érosion généralisée	Érosion concentrée, fort ruissellement	Jadan 22 %	2 700 m 700 mm	Maïs + pâturages	Ranker d'érosion, 0,2 m maximum d'épaisseur, reposant sur des argilites, nombreux cailloux
	Bassin versant Catamayo Altérites peu épaisses, roche du socle		Ruissellement diffus relayé par érosion concentrée,	Vega Grande 25 %	1 500 m 600 mm	Maïs + canne à sucre	Sol vertique peu épais (0,2-0,3 m d'épaisseur), avec quelques cailloux, développés sur altérites colluvionnées
HORS SIERRA	Bassin versant Guayas Ancien cône de déjection matériau argileux très altéré	PIEDMONT érosion lâche	Érosion concentrée, chevelu dense rigoles + ravines	Ventanas 20 %	220 m 1 800 mm	Maïs, riz, soja	Sol vertique épais, (> 1 m de profondeur) sur cônes de déjection très altérés, localement fin placage de cendres en surface

Tabl. IX — Présentation des bassins versants et des stations

Les résultats des parcelles de ruissellement témoins

Les résultats globaux sont exprimés de la façon suivante :

- par un tableau synthétique (tabl. X) qui reprend les valeurs moyennes de ruissellement et d'érosion par station et pour toute la période d'observations ;
- par une série d'histogrammes (fig. 15 et 16) qui expriment par station et par année les valeurs moyennes annuelles de ruissellement (ordonnée de droite) et d'érosion (ordonnée de gauche en échelle logarithmique).

Dans les deux cas, le ruissellement est exprimé par un coefficient qui indique le pourcentage d'eau ruisselée par rapport à la pluie tombée. Conventionnellement, le coefficient de ruissellement est noté KR %. KRm représente la moyenne mensuelle, KRa la moyenne annuelle et KRM la moyenne des valeurs annuelles sur toute la période. Lorsque l'on fait référence à la valeur maximale de KRm, ce qui est le cas le plus fréquent, on la note : KRm. max.

Dans les deux cas, l'érosion telle qu'elle a été mesurée sur le terrain au pied des parcelles de ruissellement est exprimée par un poids¹. Dans la mesure où notre travail porte sur des moyennes regroupant plusieurs dizaines de résultats d'érosion, l'unité de poids choisie est la tonne rapportée à une surface de référence, l'hectare : l'érosion est donc notée t ha⁻¹.

La durée de la période d'expérimentation est variable selon les stations. Les séries de données les plus longues, soit une durée de cinq ans comprise entre 1986 et 1991, sont issues des quatre stations (Tumbaco, Cangahua, Mojanda Riobamba) qui sont situées dans les bassins versants de

Les résultats globaux

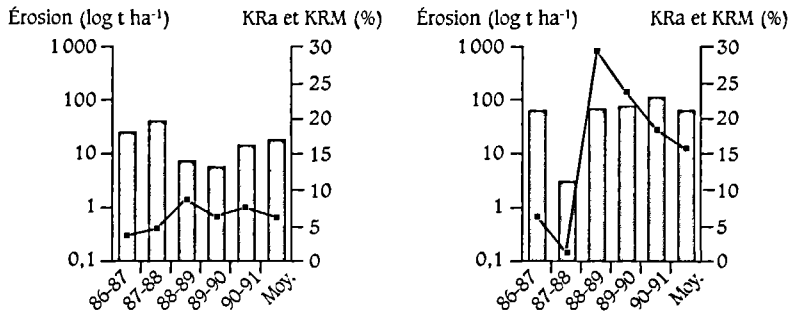
¹ L'érosion est exprimée en tonnes par hectare (t ha⁻¹) par an. À la suite d'une pluie érosive, le bac de sédimentation contient un certain volume d'eau ruisselée. Les particules de sol les plus lourdes sont déposées sur le fond du bac, et les plus légères continuent de flotter en suspension dans l'eau. On mesure d'abord le volume d'eau ruisselée en vidant progressivement le bac et on prend une série d'échantillons afin d'évaluer le poids des sédiments en suspension. Une fois le bac vidé, on peut peser les sédiments déposés sur le fond.

Parcelle témoin plantée

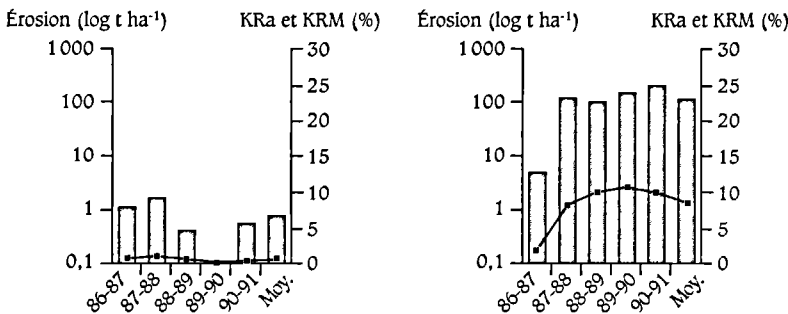
Parcelle témoin non plantée

FIG. 15 — Érosion ($\log t ha^{-1}$), ruissellement moyen annuel (KRa) et KRM (%) (1986-1991). Témoin planté et témoin non planté (Tumbaco, Mojanda, Cangahua, Riobamba)

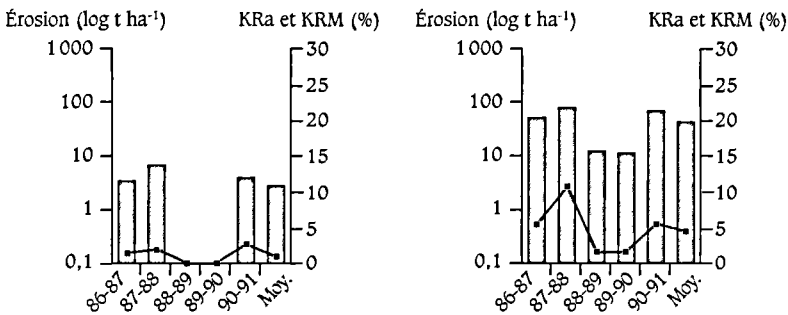
Tumbaco



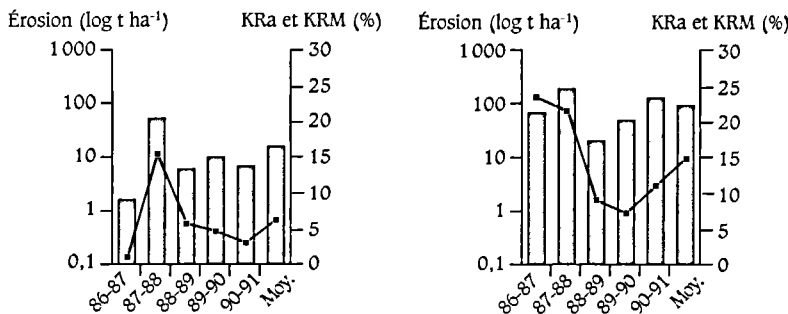
Mojanda



Cangahua

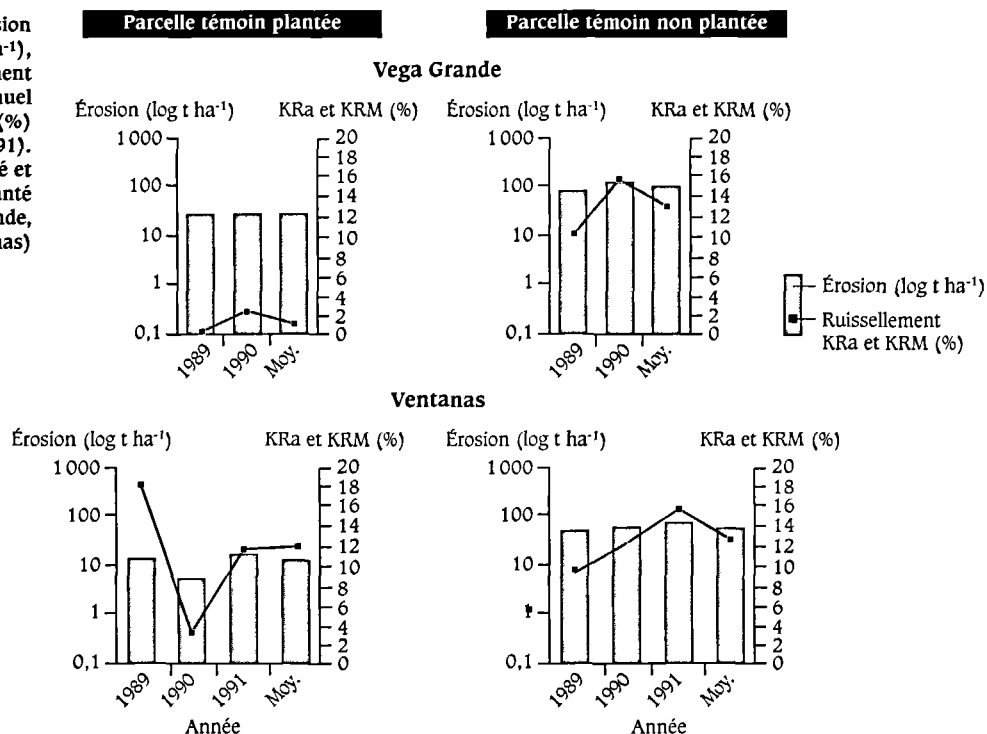


Riobamba



Érosion ($\log t ha^{-1}$)
 Ruissellement
 KRa et KRM (%)

Fig. 16 — Érosion (log t ha⁻¹), ruissellement moyen annuel (KRa) et KRM (%) (1989-1991). Témoin planté et témoin non planté (Vega Grande, Ventanas)



Guayllabamba et de Pastaza, sur des sols de type andosol (DE NONI *et al.*, 1989-1990). Les stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas ont été installées plus tardivement et les mesures n'ont couvert que les années 1989-1991, et parfois de façon incomplète. L'éloignement de ces stations par rapport à notre base de travail de Quito (entre 400 et 800 km) n'a pas permis un contrôle des observations aussi régulier que pour les stations situées dans la Sierra du Nord. Lorsqu'il manque des données, seuls ont été pris en compte les résultats des stations du Nord dans cette phase d'interprétation du comportement des parcelles de ruissellement témoins. Néanmoins, grâce aux simulations de pluies, dont l'analyse fait l'objet du chapitre suivant, il a été possible de pallier l'absence de données en provenance des stations du Sud.

Les données du tableau X, complétées par celles des figures 15 et 16, apportent une première série d'informations qui révèlent la tendance générale de la dynamique suivie par les processus. On note que pour toutes les stations, les pertes en eau et en terre sont plus fortes sur les parcelles témoins non plantées, excepté à Ventanas, où les valeurs de la parcelle témoin plantée sont légèrement supérieures à celles de la parcelle

		Stations/Sols/Pentes (%)		Témoign planté		Témoign non planté	
				KRM %	Érosion t ha ⁻¹	KRM %	Érosion t ha ⁻¹
avec dépôts pyroclastiques	BV	Tumbaco/sol mologique/20 %		6,1	19,3	18,6	87,2
		Cangahua/andosol induré/18 %		1,2	3	5	50,5
	Guayllabamba	Mojanda/intergrade sol mologique-andosol hydraté/40 %		0,6	0,8	8,8	131,6
		BV Pastaza		Riobamba/sol vitrique/35 %		6,3	15,4
sans dépôts pyroclastiques	BV Santiago	Jadan/ranker d'érosion/22 %		4	17	8,5	97,7
	BV Catamayo	Vega Grande/25 %	sols	0,3	27,9	10,2	82,7
	BV Guayas	Ventanas/20 %	vertiques	12,4	17	11,9	60,8

Tabl. X — Valeurs moyennes par station des coefficients de ruissellement (KRM, %) et de l'érosion (Ér. en t ha⁻¹) pour toute la période d'expérimentation (1986-1991)

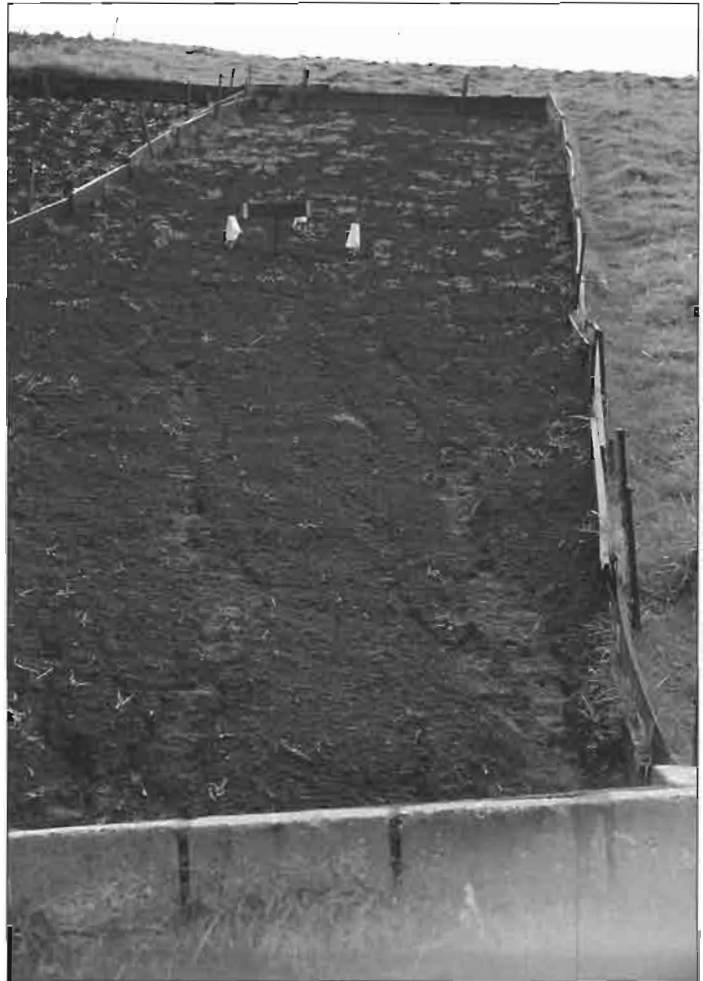
témoign non plantée. Il est intéressant de noter que les valeurs du ruissellement n'impliquent pas toujours de façon directe des pertes en terre de même ampleur. Par exemple, le ruissellement le plus élevé, mesuré à Tumbaco, ne correspond pas aux pertes en terre les plus importantes ; à l'opposé, l'érosion la plus élevée, mesurée à Mojanda, ne correspond pas au ruissellement le plus important.

Selon la classification mise au point par la FAO, l'ampleur de l'érosion est évaluée de la façon suivante :

<i>Érosion en t ha⁻¹ an⁻¹</i>	<i>Impact</i>	<i>Stations/Parcelles</i>
< 10	léger	Cangahua, Mojanda
10-50	modéré à fort	Riobamba, Tumbaco, Vega Grande, Ventanas, Jadan
> 50	fort à très fort	toutes les parcelles non plantées

Pour les parcelles témoins travaillées et plantées, deux groupes de stations se dégagent : d'une part, Cangahua et Mojanda, qui ont subi une érosion annuelle inférieure à 10 tonnes et, d'autre part, Riobamba, Tumbaco, Vega Grande, Ventanas et Jadan, où l'érosion moyenne annuelle est comprise entre 10 et 50 tonnes. En ce qui concerne les parcelles témoins non plantées, toutes les stations se situent au-dessus de 50 tonnes par hectare, dans la classe d'érosion de catégorie forte à très forte.

La parcelle expérimentale de ruissellement porte bien son nom, car elle permet de mesurer l'érosion due au ruissellement de l'eau sur la pente et d'apprécier son action d'incision dans le sol. On relève sur la photo la présence de quelques griffes et de deux rigoles principales qui érodent le sol volcanique (andosol hydraté désaturé) d'une des petites parcelles de la station de Mojanda. Il a suffi d'une longueur de pente de cinq mètres pour que l'eau incise le sol.



Néanmoins, il est difficile de porter un jugement objectif à partir d'une telle classification, qui reste trop générale pour que ressortent les spécificités du milieu andin de l'Équateur. À Cangahua, une érosion de 3 t ha^{-1} est encore trop importante pour un sol peu épais – à peine une vingtaine de centimètres en moyenne – et qui repose sans transition sur la cangahua indurée et stérile. À Ventanas, où il pleut trois à quatre fois plus qu'à Cangahua et où le sol atteint un mètre de profondeur, une érosion moyenne de 17 t ha^{-1} est comparativement moins dramatique (NAHALL, 1975 ; CTFT, 1979).

Ce qui ressort également à l'examen de ces données, plus clairement que leurs valeurs respectives, c'est l'irrégularité des quantités de terre

déplacées d'une année sur l'autre, quelles que soient les stations. Par exemple, la parcelle témoin plantée de la station de Tumbaco révèle des variations importantes des valeurs d'érosion d'une année sur l'autre (fig. 15) : 25 t ha⁻¹ en 1986-1987, 43,5 t ha⁻¹ en 1987-1988, 7,2 et 5,7 t ha⁻¹ respectivement en 1988-1989 et en 1989-1990, et 15,2 t ha⁻¹ en 1990-1991. Les coefficients de ruissellement indiquent également des variations interannuelles notables. D'autres facteurs interviennent, qui seront analysés plus loin.

Pour tenter d'expliquer cette tendance générale des processus, nous nous proposons de rechercher l'existence de possibles relations entre



Au sortir du canal de collecte en ciment, l'eau qui ruisselle de la parcelle est piégée dans plusieurs bacs. Les éléments grossiers se sédimentent préférentiellement dans le premier bac alors que les éléments les plus fins se retrouvent dans le dernier. Les deux premiers bacs sont pleins d'eau et de terre alors que le dernier n'est rempli qu'au tiers de son volume. La présence de partiteurs sur le second bac a permis de collecter tous les produits d'une érosion importante sur la station de Tumbaco. Dans la Sierra, il est fondamental d'utiliser un dispositif adapté à de fortes érosions.

l'érosion, le ruissellement et les principaux facteurs environnementaux participant à cette dynamique, à savoir : la végétation, le sol, la pente et les précipitations.

Ce facteur a été étudié sur les parcelles témoins travaillées et plantées, qui sont les seules à porter une culture et donc à reproduire l'effet du couvert végétal, par le biais de la culture, associée à un type de travail du sol. Les histogrammes des figures 15 et 16 illustrent clairement l'influence de ce facteur. Ces parcelles se distinguent en effet des parcelles témoins non plantées par des pertes en eau et en sol moins élevées. Sur les parcelles plantées, l'érosion ne dépasse pas 30 t ha^{-1} et les coefficients de ruissellement sont inférieurs dans l'ensemble à 10 %. Seule se distingue la station de Ventanas, avec un coefficient de ruissellement légèrement plus élevé sur la parcelle non plantée : 11,9 % contre 12,4 % en situation plantée.

Pour illustrer à l'échelle de la station et de l'année l'influence de la culture et des pratiques culturales, une analyse des observations réalisées à Tumbaco a été menée. Une nouvelle série d'histogrammes a été réalisée afin de comparer pour deux périodes distinctes, 1988-1989 et 1989-1990, la réponse au ruissellement et à l'érosion de la parcelle témoin plantée en maïs et de la parcelle non plantée (fig. 17). Chaque période est donc représentée par un couple de graphes montrant le comportement des deux types de parcelles. Tous les graphes sont conçus de la façon suivante : en abscisse sont portées les périodes décennales, de janvier à décembre ; et sur une double ordonnée d'échelle logarithmique, à gauche sont indiqués les volumes d'eau ruisselée ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), et à droite l'érosion en t ha^{-1} . Le ruissellement est figuré par des barres noires et l'érosion par des barres blanches. En comparant les graphes deux à deux, il ressort assez clairement que les pertes en eau et en terre sont supérieures sur les parcelles témoins non plantées. Les seules périodes où il y a érosion sur les témoins plantés, et en quantité réduite cependant par rapport aux autres parcelles, se situent soit entre les décades 29 et 9 (semis et début de croissance de la plante), soit entre les décades 20 et 25, après la récolte. Ces périodes correspondent aux moments de l'année où le sol est le plus mal couvert, et donc le plus vulnérable à l'érosion.

L'évolution des pluies et des pertes en eau et en terre n'est pas représentative de la seule station de Tumbaco. On retrouve ces tendances sur les autres stations ; en fait, il s'agit d'un comportement assez classique et souvent souligné de l'influence du couvert de la plante associé au travail

Les résultats par facteurs

Le facteur végétation

Année 1988-89

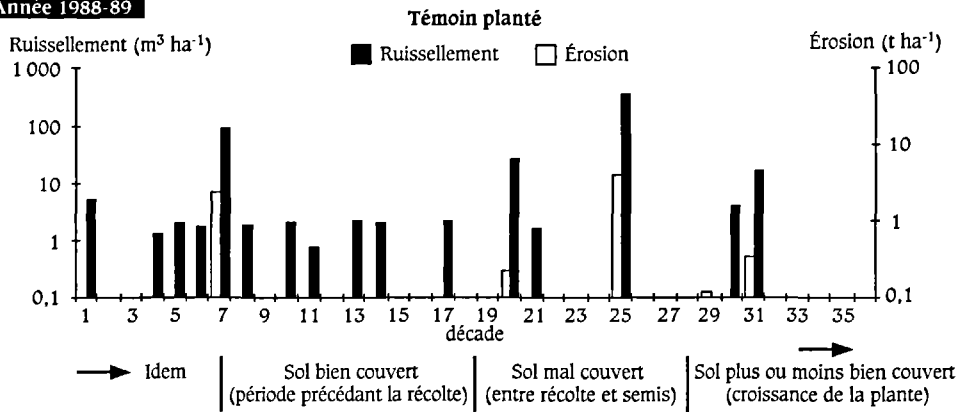
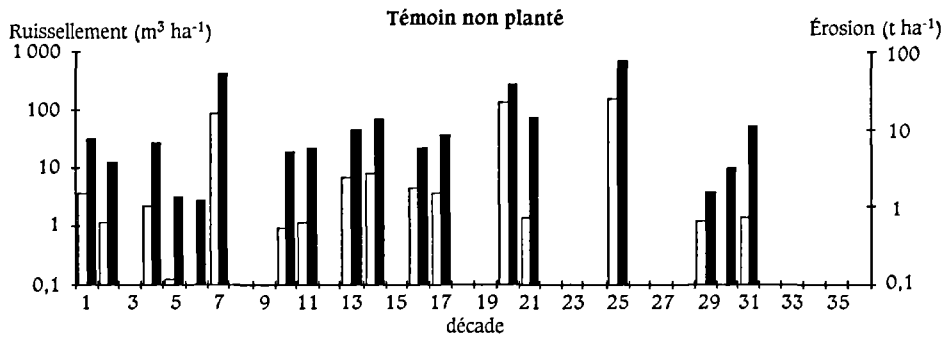
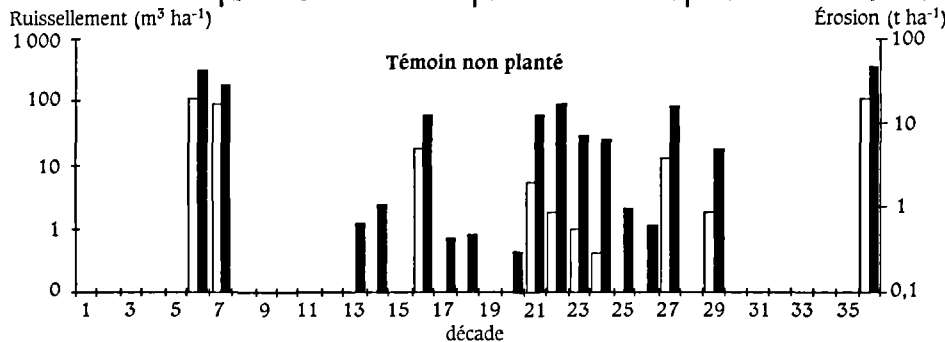
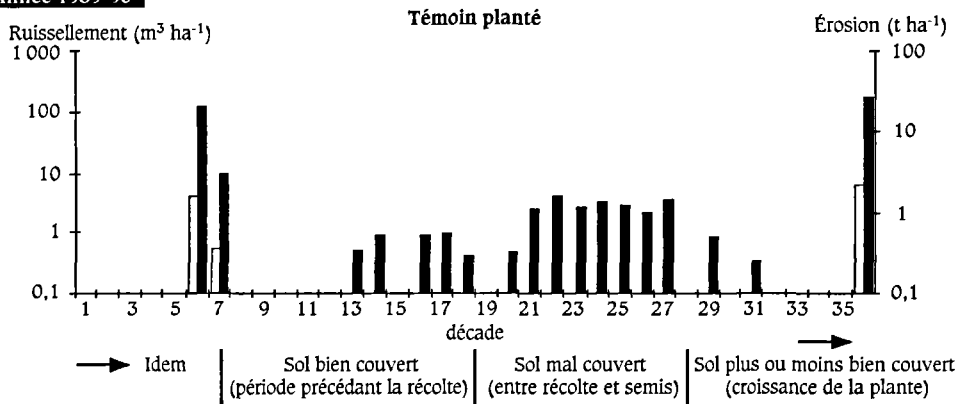


FIG. 17 — Ruissellement, érosion et pluies décennales. Témoin planté, témoin non planté (Tumbaco, 1988-1990)



Année 1989-90



du sol sur l'évolution de l'érosion et du ruissellement. Au travers de cet exemple stationnel, il est donc confirmé que les risques d'érosion accélérée sont très élevés durant les périodes où le sol est mal couvert. Il en ressort également, outre l'irrégularité interannuelle des quantités de terre déplacée déjà signalée, la variabilité temporelle des manifestations d'un cycle cultural à l'autre, d'où l'absence d'une période érosive bien marquée. Ainsi, les histogrammes de la figure 17 présentent des différences notables pour une même parcelle et pour une même période lorsque l'on compare les années entre elles.

Pour analyser cet effet, seules sont prises en compte les parcelles témoins non plantées, sur lesquelles l'absence de culture et de pratiques culturales permet d'isoler cet effet pour mieux l'apprécier. Par comparaison avec les parcelles témoins plantées, les pertes en eau et en terre sont plus importantes (cf. tabl. X et fig. 15 et 16). En rapportant les valeurs de ruissellement et d'érosion des parcelles témoins non plantées à celles des parcelles témoins cultivées, il ressort que Mojanda présente les rapports les plus élevés : la quantité d'eau perdue est 14 fois supérieure et celle de terre érodée 160 fois sur le témoin non planté. Puis viennent la station de Cangahua, avec 16 fois plus d'érosion, et les stations de Tumbaco et de Riobamba, avec 5 à 6 fois plus d'érosion. Les stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas ont un comportement moins tranché entre ces deux situations avec des rapports de l'ordre de 3. De la même façon que pour les parcelles cultivées, l'érosion des parcelles non cultivées se caractérise d'une année sur l'autre par l'irrégularité de ses quantités et la variabilité temporelle de ses manifestations.

À partir de ces données, plusieurs régressions ont été calculées pour déterminer les corrélations entre les valeurs moyennes de ruissellement et d'érosion (tabl. X) et les données caractérisant les principaux constituants du sol : matière organique, texture et densité apparente. N'ayant obtenu aucune relation satisfaisante entre l'érosion et l'un ou l'autre de ces constituants, nous nous sommes inspirés des travaux de BRYAN (1968) qui a établi plusieurs corrélations significatives à partir d'associations de classes texturales. Il est arrivé à de bons résultats en utilisant les associations suivantes : sable fin + limon fin/argile + (10 x matière organique) ; sable/limon + argile + matière organique ; 1,5 limon fin + 0,75 limon grossier/argile + (10 x matière organique). Le résultat est une nouvelle fois décevant, car, en procédant de la sorte, on n'a pas pu faire apparaître de relation fonctionnelle significative entre les constituants du sol et les valeurs de l'érosion et du ruissellement. Force est de reconnaître qu'il est

L'effet du sol

difficile, pour ne pas dire illusoire, d'isoler le comportement du sol sur une parcelle de ce type. Le fait d'avoir éliminé l'effet végétation/culture ne suffit pas, car il subsiste les effets introduits par la pente et le climat. C'est l'une des raisons principales qui nous ont conduits à développer la simulation de pluies, en complément de l'étude stationnelle.

Nous nous sommes intéressés ensuite aux constituants des sédiments érodés prélevés dans les bacs de sédimentation. ROOSE (1981, 1994), COLLINET (1988) CASENAVE et VALENTIN (1989) montrent dans leurs travaux qu'il existe une sélection texturale dans les sédiments érodés lorsque l'érosion est en nappe. L'énergie des pluies provoque par détachabilité l'érosion des particules fines, argiles et matière organique, qui se retrouvent ainsi en quantité majoritaire dans les sédiments érodés. En revanche, l'érosion linéaire n'est pas sélective, le ruissellement arrachant les particules de sol sous forme d'agrégats (BOLLINE, 1982 ; POESEN et BRYAN, 1989-1990 ; ROOSE, 1994). Son action est particulièrement efficace sur les pentes. Pour évaluer cet effet éventuel, on a comparé les analyses des sols en place avec celles des sédiments érodés des stations de Tumbaco,

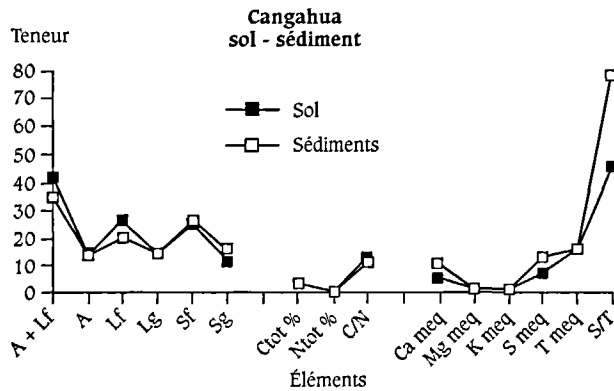


FIG. 18 — Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques (Cangahua)

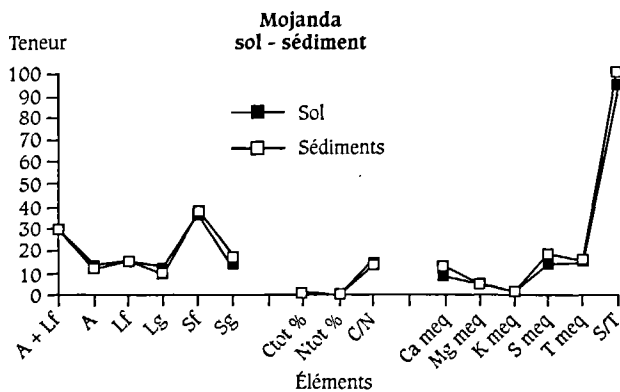


FIG. 19 — Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques (Mojanda)

Cangahua, Mojanda et Riobamba. Les échantillons ont été prélevés dans l'horizon de surface en place (0-5 cm de profondeur), dans et hors des parcelles, et comparés aux sédiments prélevés dans les bacs. Les comparaisons au cas par cas indiquent que l'érosion n'est pas sélective, les fluctuations n'étant pas assez marquées pour être interprétables, comme le montrent les graphes 18 et 19 des stations de Cangahua et de Mojanda pris en exemple. En faisant abstraction de la variabilité des prélèvements et des analyses, on peut donc conclure à la similitude de ces deux types d'échantillons en ce qui concerne l'analyse mécanique, le carbone, l'azote et la plupart des propriétés d'échange. En outre, l'analyse de quelques pluies unitaires, difficiles à isoler cependant compte tenu du protocole de terrain utilisé, a indiqué les mêmes tendances (MIETTON, 1988).



Des dispositifs de collecte de l'eau de ruissellement sont installés sur toutes les parcelles de ruissellement. Le premier d'entre eux est constitué d'un canal en ciment, en forme de « V » évasé, servant à collecter les eaux qui arrivent de la parcelle et à les orienter vers les bacs de décantation situés juste après le canal.

Sur la photo figurent deux ustensiles indispensables : le seau pour mesurer les volumes d'eau ruisselés et la balance pour peser les sédiments transportés par les flux d'eau.

Ce résultat n'est pas surprenant, compte tenu de la qualité médiocre des régressions entre l'érosion et les classes texturales. Comme on pouvait s'y attendre, le ruissellement concentré a une action forte sur l'érosion des sols en montagne.

L'effet de la pente.

Selon la même démarche, des régressions ont été calculées pour définir s'il existe une corrélation entre les valeurs globales d'érosion des sept stations et l'inclinaison de leur pente. Les résultats sont présentés sur la figure 20.

On constate une dépendance fonctionnelle entre les deux variables, l'érosion croissant de façon linéaire avec l'inclinaison de la pente. Plus de 60 % des variations de l'érosion s'expliquent par celles de l'inclinaison

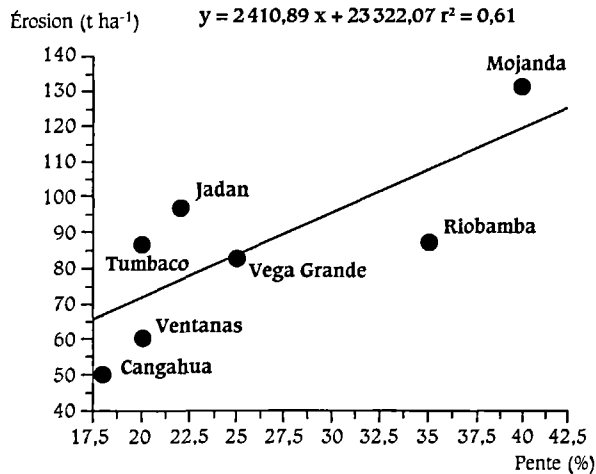
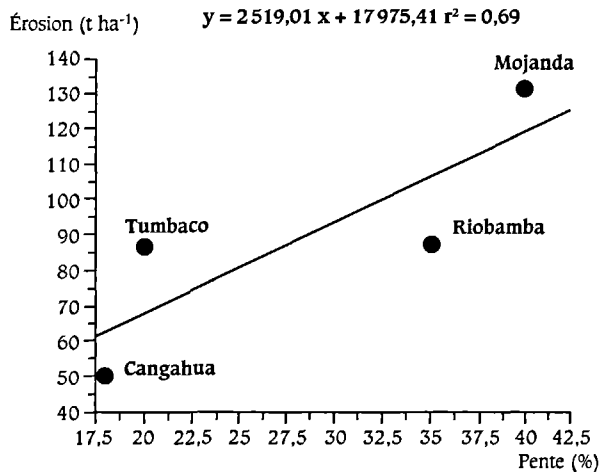


FIG. 20 — Corrélation entre les valeurs globales d'érosion des stations et l'inclinaison de leur pente



de pente ($r = 0,78$, significatif au seuil de 1 %). Si on ne prend en compte qu'un effectif réduit aux stations de Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba, pour lesquelles les données d'érosion sont les plus nombreuses et les plus complètes, ce pourcentage s'élève à près de 70 %.

En revanche, les relations sont faibles entre la pente et les moyennes de ruissellement, moins de 50 % de la variance étant expliquée. Ce constat rejoint les observations faites précédemment sur les histogrammes des figures 15 et 16, où nous avons noté que dans certains cas les forts taux d'érosion ne correspondent pas aux forts ruissellements. Il est difficile, en effet, d'apprécier l'effet des volumes d'eau ruisselés en montagne. Sur faibles pentes, le sol, devenu battant ou saturé, ruisselle et le ruissellement croît en s'accompagnant en général d'une augmentation de l'érosion. Sur fortes pentes, la dynamique semble différente. Les travaux de FOURNIER (1960), LAL (1982), POESEN (1987 b), POESEN ET BRYAN (1989-1990), ROOSE (1994) montrent que, sur fortes pentes, le ruissellement incise la croûte de battance et ouvre le sol, ce qui permet d'augmenter l'infiltrabilité de l'eau. Il reste néanmoins suffisamment d'eau en surface pour arracher et transporter les particules de sol si l'inclinaison de la pente le permet.

Par ailleurs, la longueur de la pente ne semble pas être un facteur déterminant. Sur nos stations, les parcelles plantées et non plantées montrent un comportement à l'érosion et au ruissellement distinct alors qu'elles ont la même longueur de pente, qui est de 20 mètres. Dans ce cas, la longueur de pente est une constante qui n'explique pas les différences observées. Nos mesures rejoignent d'autres observations. Par exemple, les travaux de ROOSE (1994 : 112-114) n'ont pas établi de relation entre l'érosion et la longueur de pente. En outre, par rapport à l'objectif d'application de notre recherche, ce facteur ne s'est pas avéré d'une importance capitale. En effet, la longueur de pente est l'un des facteurs généralement pris en compte par les techniciens et les ingénieurs pour déterminer la fréquence et la localisation des ouvrages de conservation sur le versant. Les calculs ainsi effectués ignorent le plus souvent le point de vue des paysans qui sont généralement réticents, car l'installation d'ouvrages de cette nature se fait au détriment de la surface cultivable. Dans la pratique, la recherche d'un compromis entre l'opposition du paysan et la logique technique semble donc nécessaire. En ce sens, la prise en compte stricte de la longueur de pente est certainement à revoir pour rallier un plus grand nombre de paysans et faire aboutir la lutte antiérosive.

L'effet des précipitations

Depuis près de cinquante ans, avec notamment les travaux de l'école américaine (ELLISON, 1944 ; WISCHMEIER et SMITH, 1978, 1981 ; HUDSON, 1983) puis ceux de l'école française (FOURNIER, 1960 ; ROOSE, 1973, 1977, 1981 ; BOIFFIN *et al.*, 1986 ; CASENAVE et VALENTIN, 1989), il est admis que les précipitations agissent davantage par leur intensité que par leur abondance. La pluie, par son intensité et l'énergie qu'elle libère au contact du sol, provoque un effet mécanique de détachabilité des particules du sol. Ce processus revêt donc une importance primordiale puisque les matériaux fins ainsi produits peuvent être entraînés par le ruissellement.

Nos stations andines se placent dans ce schéma :

- les tentatives de régressions pour évaluer l'existence éventuelle d'une relation fonctionnelle entre l'érosion et la pluie ont donné des coefficients de corrélation linéaire très faibles pour toutes les stations, moins de 20 % de la variance étant expliquée. Ainsi se présente le cas de la station de Cangahua, où l'érosion, qui est pour la période 1987-1988 de l'ordre de 90 t ha⁻¹ pour une hauteur pluviométrique annuelle de 435,7 mm, n'est plus que de 15 t ha⁻¹ pour les deux périodes suivantes, 1988-1989 et 1989-1990, alors que la pluviométrie annuelle est plus élevée : respectivement 691,5 mm et 488,6 mm pour ces deux périodes (fig. 15 et 16) ;
- en revanche, les tentatives de régressions pour établir d'éventuelles relations fonctionnelles entre l'érosion et l'intensité maximale de pluie durant 15 minutes (IM 15) et durant 30 minutes (IM 30) ont abouti à des coefficients de corrélation linéaires bien plus probants : en effet, les résultats expliquent selon les stations entre 50 % et 70 % de la variance ($0,72 < r^2 > 0,50$) et les variables sont corrélées significativement au seuil de 1 % dans tous les cas étudiés. Les graphes des figures 21 et 22 illustrent cette tendance pour les stations de Tumbaco et Mojanda.

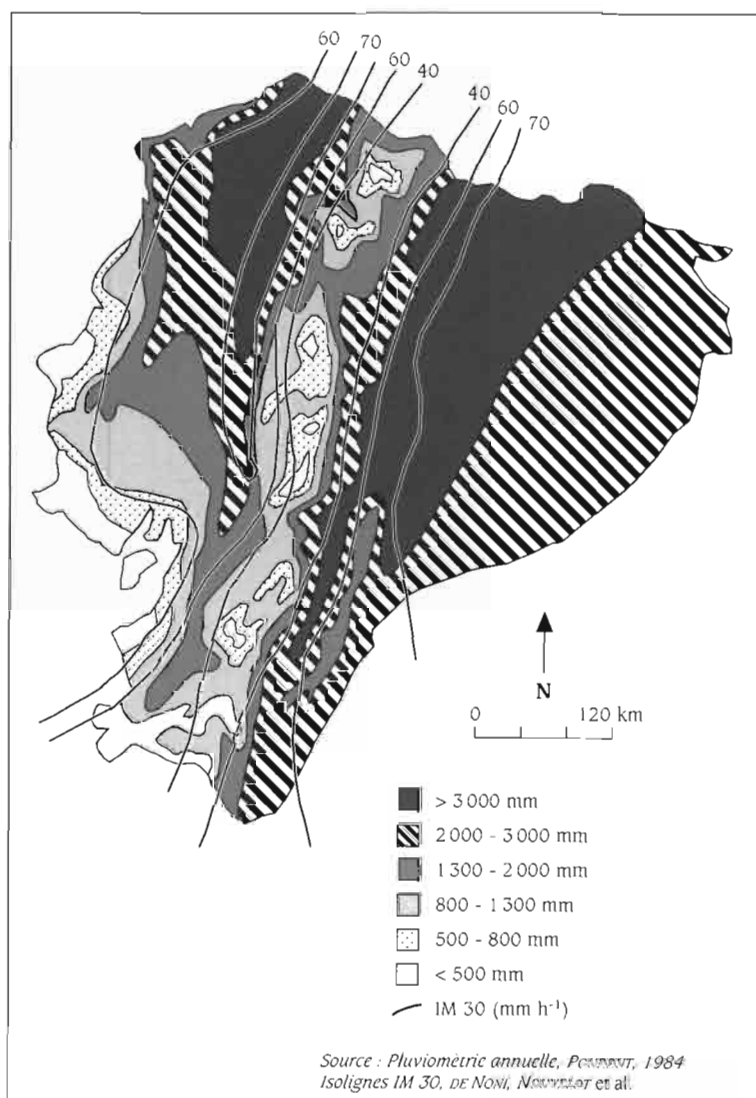
² Un aspect d'ordre métrologique mérite d'être précisé. L'IM 30 constituant la référence standard, on ne cherche pas forcément à utiliser des appareils plus précis permettant d'apprécier des intervalles de temps inférieurs à 30 minutes. En Équateur, nous avons pu avoir accès à des pluviographes de rotation journalière ou mensuelle dont l'échelle de temps plus étalée, de l'ordre de 16 mm h⁻¹, a permis un découpage plus précis des enregistrements pluviographiques. Il a ainsi été possible de dégager l'IM 15. Avec davantage de temps et des objectifs de recherche moins finalisés, il aurait été envisageable de la même façon de faire ressortir l'influence d'intensités encore inférieures comme l'IM 5.

En outre, on constate en analysant les régressions effectuées sur toutes les stations que celles-ci peuvent être meilleures avec l'IM 15² comme l'indique le graphe de Mojanda (fig. 22). En général, à la suite des travaux de WISCHMEIER et SMITH (1978, 1981) aux États-Unis et de ROOSE (1981) en Afrique de l'Ouest, il est considéré que l'IM 30 règle la battance et la naissance du ruissellement. À la lumière de ce résultat et pour les stations considérées, il semble donc que l'IM 15 tienne également un rôle essentiel et significatif pour déclencher l'érosion sur les pentes de la Sierra andine (DE NONI *et al.*, 1989-1990). LAL (1988) admet aussi que l'influence de l'IM 30 n'est pas forcément significative partout et propose de bonnes corrélations soit avec l'IM 15, soit avec l'intensité maximale durant 7 minutes (IM 7).

En procédant ainsi (fig. 21 et 22), il a été possible de déterminer les seuils à partir desquels l'intensité de la pluie, soit par l'action de l'IM 15 soit par l'IM 30, déclenche le ruissellement et l'érosion des sols sur chaque station.

Ces figures montrent que des pluies inférieures à 20-30 mm h⁻¹ durant 15 minutes et à 15-20 mm h⁻¹ durant 30 minutes ne provoquent qu'une érosion faible. Ce sont les pluies qui dépassent ces seuils qui doivent être prises en compte pour lutter efficacement contre l'érosion. Néanmoins, les pluies d'énergie supérieure à ces limites sont rares – plus de 80 % des

CARTE 16 —
Pluviométrie annuelle en mm
(période 1965-1978)
et isolignes d'intensité maximale
en mm h⁻¹ durant 30 mm et
de fréquence médiane (IM 30)



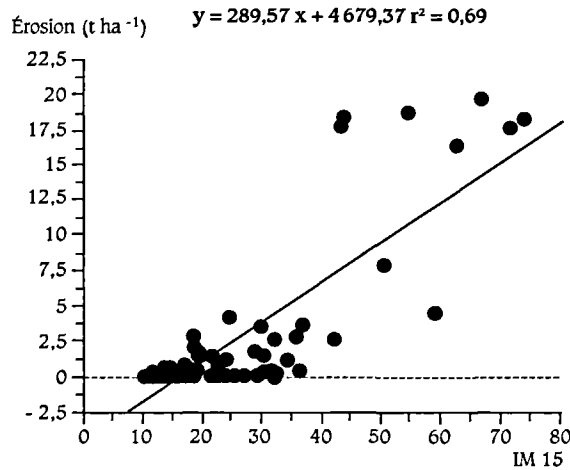
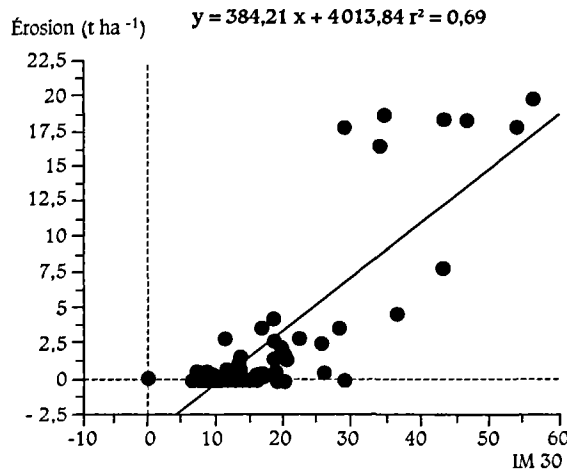


FIG. 21 — Corrélation érosion en fonction de l'IM 15 et de l'IM 30 (Tumbaco)

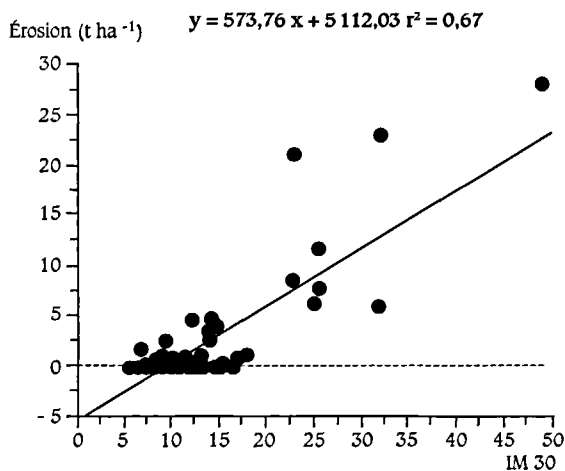
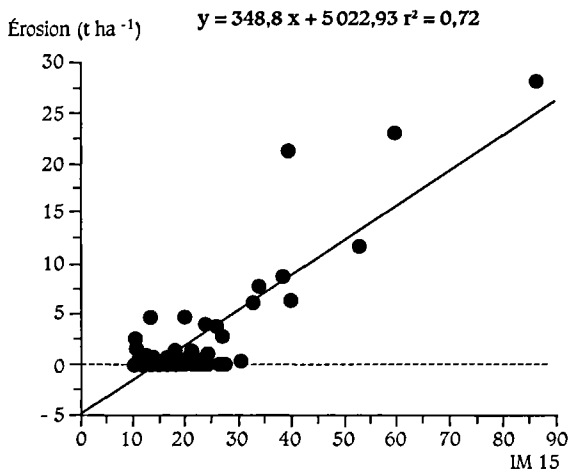


³ À la suite des travaux des chercheurs américains, nous avons tenté d'apprécier les valeurs de l'IM 30 pour évaluer la sensibilité des milieux de la Sierra à l'agressivité des pluies. ROOSE (1981) a établi pour l'Afrique de l'Ouest une relation simple entre l'indice d'agressivité annuel moyen et la hauteur moyenne annuelle de la pluie. Par ce procédé, une relation significative a été obtenue, qui s'appuie sur les données de 24 postes pluviographiques. Les valeurs correspondantes ont permis de tracer sur la carte 16 des isolignes illustrant les variations de l'IM 30 (DE NONI et NOUVELOT, 1983 ; DE NONI et al., 1985, 1986 a).

pluies annuelles ne les dépassent pas – mais elles sont liées aux érosions les plus fortes. Le tableau XI présente les rapports en % entre l'érosion due aux cinq pluies les plus érosives et l'érosion annuelle pour les stations de Tumbaco et de Mojanda. Quelles que soient les parcelles considérées dans ce tableau, les rapports moyens sur cinq années sont compris entre 69 % et 79 % à Mojanda, et entre 78 % et 96 % à Tumbaco (CTFT, 1966, 1970).

La carte de la pluviométrie annuelle³ (carte 16, 1965-1978), sur laquelle on a reporté les isolignes d'intensité maximale de pluie durant 30 minutes et de fréquence moyenne, corrobore cette tendance. On remarque que les valeurs d'intensité décroissent à mesure que l'on se rapproche de la zone montagneuse au centre de la carte. Les valeurs sont inférieures à 40 mm, ce qui est assez faible par rapport aux autres régions basses du

FIG. 22 — Corrélation érosion en fonction de l'IM 15 et de l'IM 30 (Mojanda)



pays, où les intensités de pluie dépassent 60-70 mm h⁻¹, ce qui indique une certaine tendance à la baisse des intensités de pluie à mesure qu'augmente l'altitude.

Pour pouvoir comparer le degré d'agressivité des pluies des Andes équatoriennes à celui d'autres milieux, on a calculé l'indice d'érosivité de WISCHMEIER et SMITH (1978, 1981), généralement employé. Cet indice se calcule en multipliant l'intensité maximale de la pluie en 30 minutes par son énergie cinétique (valeur déterminée automatiquement à partir du tableau mis au point par WISCHMEIER ET SMITH, 1978). Les valeurs de cet indice sont : 90 à Tumbaco, 60 à Cangahua, 110 à Mojanda et à Riobamba. Comparativement, dans d'autres milieux, elles sont comprises entre :

- 20 et 650 aux États-Unis (WISCHMEIER et SMITH, 1978),

Station de Tumbaco				Parcelle témoin plantée			Parcelle témoin non plantée		
Années	Pluies (mm)	Sommes des cinq pluies	Cinq pluies/parcelle	Érosion annuelle	Érosion cinq pluies	Rapport (%)	Érosion annuelle	Érosion cinq pluies	Rapport (%)
86-87	688,3	178,9	26,0	25 019	24 209	96,8	69 934	62 220	89,0
87-88	706,5	172,0	24,3	43 528	42 782	98,3	107 155	84 776	79,1
88-89	627,1	217,5	34,7	7 246	6 683	92,2	77 193	62 164	80,5
89-90	625,7	258,2	41,3	5 753	5 324	92,5	94 270	85 511	90,7
90-91	777,4	145,2	18,7	15 147	13 858	91,5	128 242	79 049	61,6
Moyenne sur 5 ans	685,0	194,4	28,4	19 339	18 571	96,0	93 359	74 744	78,4

Station de Mojanda				Parcelle témoin plantée			Parcelle témoin non plantée		
Années	Pluies (mm)	Sommes des cinq pluies	Cinq pluies/parcelle	Érosion annuelle	Érosion cinq pluies	Rapport (%)	Érosion annuelle	Érosion cinq pluies	Rapport (%)
86-87	669	144	21,5	1 185	860	72,6	5 642	4 546	80,6
87-88	886	189	21,3	1 761	1 350	76,7	137 020	116 000	84,7
88-89	1 265	252	19,9	442	178	40,3	115 316	103 526	89,8
89-90	815	152	18,7	87	79	90,8	166 261	143 168	86,1
90-91	944	135	14,3	574	474	82,6	233 545	154 187	66,0
Moyenne sur 5 ans	916	174	19,0	810	588	72,6	131 557	104 285	79,3

**Tabl. XI —
Érosion provoquée
par les cinq pluies
les plus érosives (kg ha⁻¹)**

– 20 et 150, en zone tempérée (France et Europe de l'Ouest : PHAN, 1979 ; BOLLINE, 1982),

– 50 et 350, en milieu méditerranéen (MASSON, 1971 ; KALMAN, 1967 ; HEUSCH, 1970).

– 100 à 450 en zone tropicale sèche et 500 à 1 200 en zone tropicale humide (ROOSE, 1981).

Les indices obtenus à partir de nos quatre stations se situent parmi les valeurs les plus faibles qui correspondent à la zone tempérée. Ce constat concorde assez bien avec nos observations sur la relative faiblesse des intensités des pluies andines et corrélativement sur l'absence de sélectivité dans les matériaux décapés par l'érosion.

Il faut également noter que le phénomène de grêle est très fréquent dans ce milieu tropical de montagne tempéré par l'altitude. On a observé sur le terrain que celle-ci a un impact à ne pas négliger sur l'érosion accélérée, notamment au moment où la fusion des grêlons devient maximale. Néanmoins, son action n'est pas quantifiable correctement par les pluviographes classiques, qui enregistrent le phénomène comme si celui-ci correspondait à une pluie de longue durée peu intense, appréciation due à la fonte progressive des grêlons dans le réceptacle du pluviographe, ce qui est très différent de l'impact réel de la grêle sur le sol.

En zone de montagne – plus que dans d'autres milieux, notamment en plaine, où l'érosion a été très étudiée – les essais que nous avons effectués pour mettre en évidence de possibles corrélations entre les différents facteurs du milieu et les mesures obtenues sur les stations n'aboutissent qu'à des conclusions partielles. L'absence de recherches sur d'autres montagnes tropicales accroît la complexité de notre démarche. En comparaison avec les régions de plaine, aucune corrélation significative n'a pu être établie avec le ruissellement, ce qui prouve que celui-ci fonctionne différemment en montagne. De meilleurs résultats ont été obtenus en faisant intervenir les pertes en terre. En effet, les relations érosion-pente ont révélé l'existence d'une régression simple (érosion = f (pente) qui explique plus de 60 % des variations de l'érosion.

Pour tenter d'améliorer cette régression et de dépasser le niveau partiel de nos conclusions, plusieurs régressions multiples ont été calculées en faisant intervenir toutes les variables dont nous disposons : texture du sol, matière organique et densités apparentes. De ces différents essais de calculs, il ressort que la meilleure corrélation multiple s'établit avec l'argile : on passe en effet de : érosion = f (pente) avec $r^2 = 0,61$ et $r = 0,78$ à : érosion = f (pente ; argile) avec $r^2 = 0,81$ et $r = 0,9$. En ajoutant dans le calcul la « densité apparente » comme troisième variable possible – soit érosion = f (pente ; argile ; densité apparente) –, on arrive à : $r^2 = 0,92$ et $r = 0,96$. Les coefficients de pente sont positifs pour les variables « pente et argile » et négatifs pour la variable « densité apparente ». Autrement dit, si l'on s'en tient à cette régression multiple : sur les sept stations de notre dispositif de terrain, plus la pente est forte, plus le taux d'argile est élevé dans le sol et plus la densité apparente de ce dernier est faible, plus l'érosion est importante.

Hiérarchie des facteurs

En premier lieu, la part majeure prise par la pente dans ce calcul traduit l'importance de son influence sur ce type de milieu : plus la pente s'incline, plus l'énergie du ruissellement augmente et plus l'érosion est forte. D'après les travaux de ZINGG (1940), LAL (1982), HUDSON (1983) et ROOSE (1994), l'érosion croît avec l'inclinaison de la pente car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15 %, ce qui est bien le cas des sept stations étudiées. Pour l'argile, sa prise en compte dans le calcul peut interpellier, car ce constituant est plutôt considéré comme un élément structurant et stabilisant du sol dans le cas de l'érosion en nappe qui agit principalement en plaine. En montagne, l'érosion en nappe est secondaire car l'action de l'érosion concentrée est dominante ; dans ce cas, le rôle de l'argile peut donc être considéré différemment. Comme le montrent les graphes 18 et 19 analysés antérieurement, le manque de sélectivité texturale des sédiments érodés plaide pour un transport du sol sous forme d'agrégats par l'érosion concentrée. Dans cette hypothèse, le rôle de l'argile ressort pour sa présence importante, en tant qu'agent agrégeant, dans les agrégats de sol érodés. Enfin, plus un agrégat est léger, plus sa flottabilité est élevée et plus il est sensible à l'entraînement par le ruissellement : c'est ce qu'exprime la place tenue par la troisième variable « densité apparente » dans la régression multiple.

D'un point de vue appliqué à la lutte antiérosive, il est clair que l'intervention sur le facteur pente est un point primordial à considérer pour essayer de diminuer et de dissiper l'énergie du ruissellement. Cette énergie est libérée par la fonction de transfert du ruissellement, autrement dit par la circulation de l'eau sur le versant. Néanmoins, étant donné la complexité du milieu montagnard et les limites méthodologiques des parcelles de mesures, l'importance du facteur sol semble quelque peu occultée, alors qu'il s'agit d'un compartiment majeur de l'agrosystème, qui joue à la fois le rôle essentiel de support des cultures et celui d'indicateur direct des manifestations de l'érosion. Le recours à la simulation de pluies a donc constitué une étape complémentaire d'observation pour préciser cet aspect.

Les résultats des simulations de pluies

La simulation de pluies permet donc d'isoler le facteur sol et d'observer son comportement sans qu'il y ait de confusions avec les autres facteurs du milieu. C'est le moyen approprié pour apprécier la naissance du ruissellement sur une placette de 1 m². En effet, avant que le ruissellement ne se concentre et ne s'accélère au gré de l'inclinaison de la pente, il se forme en surface à mesure que le sol se dégrade et se ferme. Lorsque ces conditions sont réunies, l'intensité de la pluie dépasse alors l'intensité d'infiltration de la pluie dans le sol : il y a engorgement d'eau à la surface du sol qui est prête à ruisseler. La lutte antiérosive devra donc prendre en compte cet effet qui marque la naissance du phénomène.

Les simulations de pluies ont été effectuées sur toutes les stations, soit directement sur les deux parcelles de ruissellement témoins, soit juste à proximité de celles-ci. Au total, et en incluant les répétitions, plusieurs centaines de pluies ont été simulées, qui se répartissent de la façon suivante :

- 84 pluies à la station de Tumbaco sur 15 microparcelles et 143 pluies sur 27 microparcelles de cangahua situées à quelques centaines de mètres à l'ouest de cette station ;
- 70 pluies à la station de Mojanda, sur 20 microparcelles ;
- 119 pluies à la station de Riobamba, sur 32 microparcelles ;
- 148 pluies à la station de Jadan, sur 33 microparcelles ;
- 143 pluies à la station de Vega Grande, sur 34 microparcelles ;
- 104 pluies à la station de Ventanas, sur 24 microparcelles.

Les protocoles

Situations culturelles, intensités simulées et humidité du sol



Les principes de collecte mis en œuvre sur les parcelles expérimentales sont également appliqués lors des simulations de pluies. La petite parcelle de 1 m² est équipée d'un canal de collecte de l'eau de ruissellement puis des opérateurs effectuent les mesures des flux. Les bacs de décantation ne sont pas nécessaires car les ruissellements produits sur 1 m² sont faibles et facilement mesurables manuellement.

Ont été retenues des situations culturales qui reproduisent sur chaque station l'effet du travail du sol, reproductible sur 1 m² :

- le « labour ancien », qui correspond à l'état du sol sur la parcelle de ruissellement témoin plantée. Le labour initial a été légèrement « rafraîchi » jusqu'à 20 cm de profondeur à l'aide de la houe locale, qui est l'outil couramment utilisé et qui donne au sol un aspect motteux moyen à grossier ;
- le « premier labour », qui reproduit les conditions d'un labour récent sur défriche. Dans tous les cas, le sol était couvert initialement soit par du pâturage soit par de la végétation herbacée. Après sarclage, le labour avec enfouissement des résidus est réalisé manuellement jusqu'à 20 cm de profondeur, ce qui donne un état de surface motteux grossier ;

– le « sol nu », qui correspond à l'état du sol sur la parcelle témoin non plantée. Les mottes ont été brisées et réduites au cours du temps à des agrégats inférieurs à 1 cm et la surface du sol a été ratissée dans le sens de la pente.

Nous nous sommes basés, pour le choix et la durée des intensités de pluies à reproduire artificiellement, sur l'analyse des pluies naturelles observées sur les stations de Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba, qui faisaient ressortir l'action de l'IM 30, conventionnellement retenue, mais aussi celle de l'IM 15. Pour pouvoir comparer les essais entre eux, nous avons donc appliqué une même hauteur d'eau de 15 mm par essai, quelle que soit l'intensité, ce qui donne : pour l'IM 30, une intensité de 30 mm h⁻¹ durant 30 minutes ; et pour l'IM 15, une intensité de 60 mm h⁻¹ durant 15 minutes.

Dans l'optique de tester les limites supérieures de résistance du sol en fonction des différentes situations retenues dans le protocole, une intensité encore plus forte, correspondant à une intensité maximale durant 10 minutes (IM 10), a été introduite. Pour une hauteur d'eau de 15 mm, l'IM 10 est équivalente à 90 mm h⁻¹ durant 10 minutes.

Enfin, nous avons adopté une séquence pluviométrique permettant de reproduire le rôle tenu par l'état d'humidité du sol. Pour cela, chaque pluie d'une intensité donnée est répétée au moins trois fois pour toutes les situations – sur sol sec, sur sol humide et très humide.

Une première pluie est réalisée sur un sol qui n'a pas reçu de pluie depuis au moins 10 jours et dans quelques cas rares depuis 5 à 6 jours. On reproduit ainsi l'état d'un sol se trouvant dans des conditions sèches, relativement proches de celles rencontrées en période estivale lors des orages d'été. Selon les stations, l'état d'humidité du sol au champ est compris entre 10 % et 20 %.

Une seconde pluie est simulée une heure environ après la précédente, reproduisant un état d'humidité à saturation du sol que l'on trouve dans la réalité lorsque la période pluvieuse est déjà bien avancée (humidité comprise entre 25 % et 30 %).

Et une troisième pluie intervient enfin, après une période de ressuyage qui dure en moyenne 24 heures, avec des périodes extrêmes comprises entre 20 et 30 heures. Elle conduit à un état d'humidité du sol comparable à un début de période pluvieuse (humidité comprise entre 15 % et 25 %).

Lorsque les essais comportent ainsi 3 pluies, ce qui est le cas le plus courant, la pluie n° 2 représente l'état d'humidité maximale. Dans quelques

autres cas, plus de 3 pluies ont été réalisées pour tester les limites de résistance du matériau à leurs énergies. Dans ces essais, les pluies postérieures à la pluie n° 3 (on a simulé jusqu'à 10 pluies consécutives) sont réalisées toutes les heures en moyenne. Dans ce cas, l'état d'humidité maximale ne correspond plus à la pluie n° 2 mais à la dernière pluie.

Dans la pratique, pour évaluer l'état d'humectation du sol, des échantillons sont prélevés, avant chaque simulation, sur 10 cm de profondeur environ. Ils sont ensuite séchés à l'étuve à une température de 105 °C pendant au moins 24 heures.

Les données retenues

Les données retenues correspondent aux processus majeurs qui interviennent au cours d'une averse simulée et qui se décomposent en quatre phases bien distinctes (fig. 23) (COLLINET, 1988 ; LAFFORGUE, 1977).

La première est une phase d'imbibition qui correspond à la hauteur de la pluie qui tombe sur la parcelle sans provoquer de ruissellement. Elle se produit en début d'essai et sa hauteur est variable selon les sites. Elle exprime un double processus : un processus majeur qui traduit l'infiltration

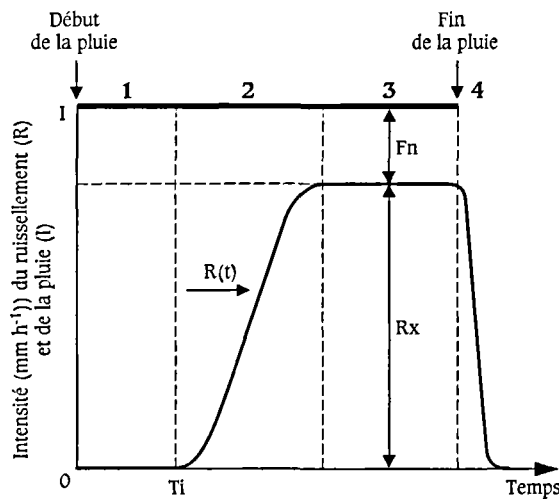


FIG. 23 — Hydrogramme théorique de ruissellement pour une pluie d'intensité constante (d'après LAFFORGUE, 1977)

- 1 - Phase d'imbibition
- 2 - Phase de transition
- 3 - Phase d'écoulement permanent
- 4 - Phase de vidange

I : intensité de la pluie ; Rx : intensité du ruissellement à régime constant ; Fn : intensité de l'infiltration à régime constant ; R(t) : courbe de ruissellement en fonction du temps.

d'une grande partie de l'eau de pluie dans le sol et un autre processus, variable selon les sites, qui dépend de la capacité de l'eau à pouvoir s'accumuler dans les petites dépressions superficielles (flaques) dont la taille est fonction de la rugosité ou du microrelief de la microparcelle. En tous points de la parcelle, hormis là où les petites dépressions de surface, si elles existent, peuvent retenir un peu d'eau, la capacité d'infiltration du sol est supérieure à l'intensité de pluie. Puis, au fur et à mesure que la surface du sol s'humecte, l'eau de pluie finit par ne plus pouvoir être absorbée, il y a refus à l'infiltration et c'est le début du ruissellement.

La seconde phase est à régime transitoire et correspond à l'augmentation progressive du ruissellement, en filets et en nappes, et à la diminution corrélative de la capacité d'infiltration du sol. L'humidité du sol augmente, l'impact des gouttes de pluie pulvérise les agrégats, les pores du sol se colmatent et les flaques débordent hors des microdépressions superficielles.

La troisième phase est à régime permanent et elle est atteinte à condition que l'essai dure suffisamment longtemps. Elle traduit un équilibre entre le ruissellement et l'infiltration. L'intensité de ruissellement se stabilise à son niveau le plus élevé jusqu'à la fin de l'averse, tandis que l'intensité d'infiltration est minimale.

Une phase de vidange survient enfin lorsque l'on arrête l'essai et que la pluie cesse. Le ruissellement, tout en se poursuivant, diminue fortement d'intensité avant de s'arrêter définitivement. L'eau qui ruisselle provient de la vidange des petites dépressions superficielles (détention superficielle récupérable). La partie de l'eau qui ne peut s'évacuer finit par s'infiltrer dans le sol.

Durant ces phases et en fonction des objectifs poursuivis, les variables explicatives suivantes ont été retenues :

- la pluie d'imbibition (P_i), exprimée en mm. Elle correspond à la phase d'imbibition de l'eau de pluie par le sol. Elle se situe systématiquement en début d'essai et exprime la hauteur d'eau qui s'infiltrer dans le sol sans produire d'écoulement superficiel ;
- le ruissellement, exprimé en mm h^{-1} . Il est mesuré au cours des essais à partir de prélèvements d'eau effectués à des pas de temps réguliers à l'exutoire de la microparcelle. Seule sera utilisée ici l'intensité maximale qui caractérise la valeur la plus forte du ruissellement en régime permanent (R_{max}) ;
- l'intensité minimale d'infiltration (F_n), en mm h^{-1} . Elle représente la capacité du sol à infiltrer lorsqu'il est proche de la saturation. Cette

valeur est obtenue également durant la phase de régime permanent. Durant cette phase, un régime d'équilibre s'établit entre le ruissellement et l'infiltration tant que l'intensité n'est pas modifiée. En conséquence, connaissant l'intensité (I) qui est constante et après avoir mesuré le ruissellement maximal (R_{max}), on peut déduire la valeur de F_n en régime permanent considérant que : $I = R_{max} + F_n$. Des variables utilisées, c'est la seule qui soit obtenue de manière dérivée par le calcul. Considérant cette manière de calculer F_n dans un état proche de la saturation, on peut dire que cette valeur traduit une intensité d'infiltration sous gradient de charge hydraulique unitaire qui est assimilable à la conductivité hydraulique ou coefficient de Darcy en sol saturé (HILLEL, 1974) ;

- les charges exportées en suspension dans l'eau, exprimées en $kg\ ha^{-1}$. Elles indiquent, dans le contexte de l'expérimentation, la partie de l'érosion due au détachement des agrégats de sol sous l'impact des gouttes de pluie (effet " splash " ou détachabilité¹).

¹ Pour rappel, la placette de $1\ m^2$ utilisée lors des simulations de pluies est trop petite pour que soit pris en compte l'effet de la pente sur l'énergie du ruissellement.

Les résultats des simulations de pluies

L'effet « situation culturale »

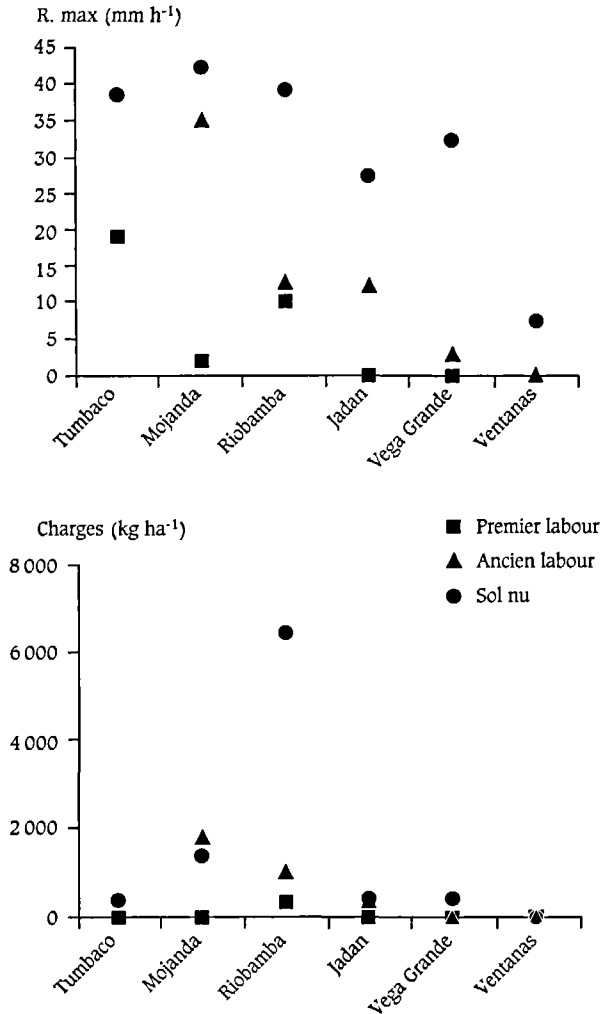
Sur la figure 24, on a reporté, à titre d'exemple, les valeurs de R_{max} et de charges mesurées sur un sol humide dans les situations culturales suivantes : premier labour, ancien labour et sol nu, avec $IM\ 15 = 60\ mm\ h^{-1}$. On remarque que, quelles que soient les stations, le premier labour, symbolisé par un carré, présente les valeurs les plus proches de l'abscisse et en conséquence les plus faibles. Pour la variable R_{max} , les valeurs des stations de Jadan et de Vega Grande sont situées sur l'abscisse, ce qui les distingue des trois autres stations. Pour la variable « charges », les carrés représentant le premier labour sont tous collés sur l'axe de l'abscisse, sauf Riobamba qui s'en détache très légèrement. Il n'y a pas eu à Ventanas de simulation de pluie sur la situation premier labour. On remarque néanmoins que la situation ancien labour est localisée sur l'abscisse pour les deux variables considérées, ce qui la distingue de l'ensemble des autres stations.

La rugosité de surface des trois situations est un facteur explicatif de premier ordre pour apprécier les différences observées.

Leur rugosité initiale se caractérise de la façon suivante :

- le premier labour présente 80 % de mottes supérieures à 5 cm, en général de 10 à 20 cm, et 20 % de mottes entre 1 et 5 cm ;
- l'ancien labour a 70 % de mottes comprises entre 1 et 5 cm, 20 % de mottes inférieures à 1 cm et 10 % de mottes supérieures à 10 cm ;

FIG. 24 — Variation de $R_{max} h^{-1}$ et des charges par station et par situation culturale



– le sol nu présente 80 % de mottes inférieures à 1 cm et 20 % de mottes comprises entre 1 et 5 cm.

En outre, par rapport à ce schéma moyen, on note quelques points particuliers :

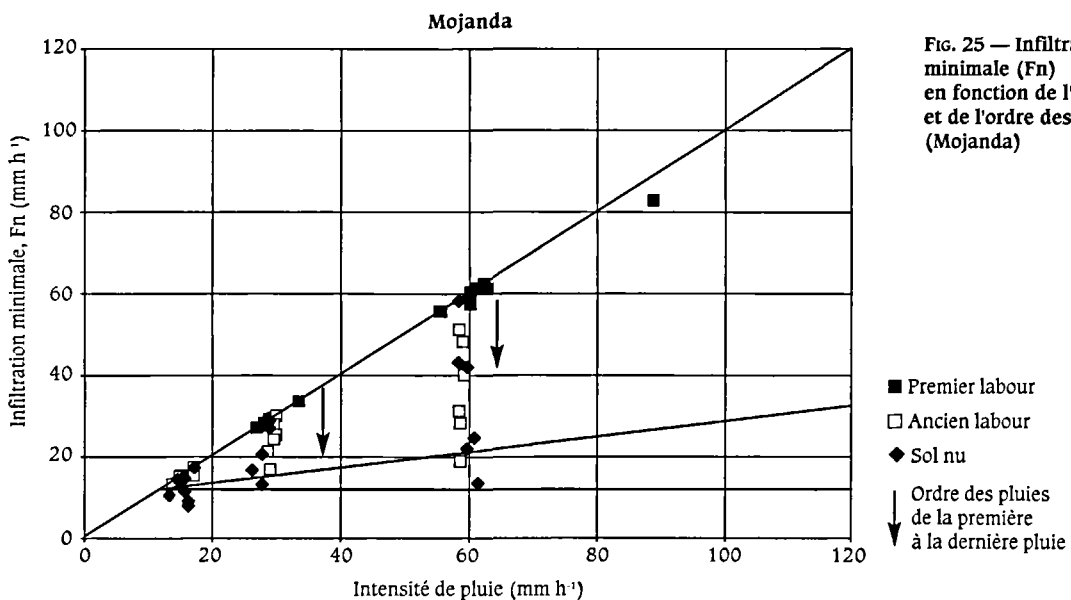
– à Tumbaco, les mottes se distinguent par leur résistance et montrent des efflorescences blanchâtres de carbonate de calcium. Rappelons que cette station se situe dans un environnement de cangahua dont l'induration est due essentiellement à la présence de ce carbonate ;

– à Jadan, le labour présente en surface de nombreux éclats de schiste. La pierrosité de surface a été évaluée en même temps qu'on procédait à la mesure de la taille des mottes, elle est de l'ordre de 30 % ;

- à Riobamba, le sol est sablo-ponceux et peu cohérent. La majorité des mottes est comprise entre 1 et 10 cm et moins de 1 cm. La différence entre le premier et l'ancien labour est difficilement perceptible. La faiblesse de l'agrégation de ce sol est due d'une part au pourcentage d'argile, de l'ordre de 3 %, qui est le plus bas de toutes les stations, et d'autre part au taux moyen de matière organique, de l'ordre de 1,4 % alors que sur les autres stations, il est compris entre 2,5 % et 2,9 %,
- Vega Grande et Ventanas se distinguent par la présence de fentes de retrait avant le labour. Ces fentes sont effacées en surface par le labour mais persistent en profondeur.

Pour observer si ces comportements changent lorsque le sol est proche de l'état de saturation, situation qui se produit généralement dans la nature après plusieurs jours de pluie, la variable F_n (intensité minimale d'infiltration en mm h^{-1}) a été utilisée. En effet, elle permet d'apprécier la capacité minimale du sol à infiltrer lorsque ce dernier est saturé et que le ruissellement a atteint son régime permanent, considérant que l'eau trouve toujours une voie pour s'infiltrer, si minime soit-elle.

On a exprimé par des graphes les valeurs de F_n en fonction des intensités de pluie pour chacune des trois situations. Parmi tous les graphes construits, on a pris l'exemple des stations de Mojanda (fig. 25) et de Vega Grande (fig. 26) parce qu'elles représentent les deux principaux domaines pédologiques nous intéressant, sol volcanique ou andosol de la Sierra du Nord pour l'une, et sol vertique de la Sierra du Sud pour l'autre.



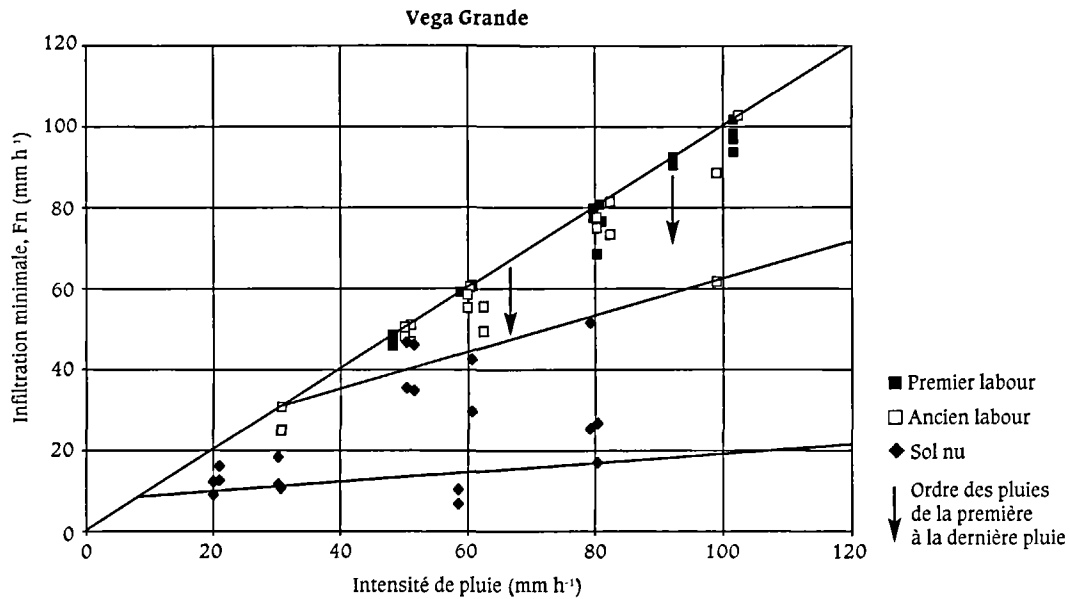


Fig. 26 — Infiltration minimale (F_n) en fonction de l'intensité et de l'ordre des pluies (Vega Grande)

À Mojanda, le comportement correspondant aux trois situations culturales est représenté sur le graphe par trois droites distinctes. Les points correspondent aux mesures effectuées à différentes valeurs d'intensités. Pour chaque intensité, plusieurs pluies ont été réalisées pour saturer progressivement le sol afin d'atteindre ou de se rapprocher le plus d'une valeur constante de F_n . Sur le graphe, une flèche noire indique les différentes pluies simulées par intensité selon un ordre croissant, depuis la première pluie jusqu'à la dernière.

La droite de plus forte pente recoupe les points (carrés noirs) qui expriment le comportement de F_n en situation de premier labour. Dans ce cas, hormis un léger décalage pour la pluie de plus forte intensité (IM 10), toute l'eau s'infiltré et l'on peut considérer que $F_n = I$. L'ordre des pluies n'intervient pas : quelle que soit l'intensité, les pluies sont regroupées sans différence particulière.

La seconde droite se rapporte à l'ancien labour indiqué par des carrés blancs. Elle se distingue de la droite du premier labour par une pente moins forte qui traduit les variations des valeurs de F_n . L'ordre des pluies intervient dans ce cas. Ce sont les dernières pluies, où les valeurs de F_n sont les plus faibles et considérées comme constantes, qui ont servi de points pour tracer la droite. Seule une partie de l'eau s'infiltré et les valeurs de F_n augmentent proportionnellement à la valeur de l'intensité de pluie et à l'ordre des pluies.

Enfin, une troisième droite de pente nulle, parallèle à l'axe de l'abscisse, exprime ces mêmes variations sur la situation de sol nu. Ce comportement traduit que les valeurs de F_n restent constantes pour toutes les intensités correspondant à la dernière pluie simulée et que le ruissellement reste actif puisque les valeurs de F_n sont supérieures à 0.

À Vega Grande, comme précédemment, les valeurs les plus basses de F_n considérées comme constantes, qui ont servi à tracer les droites, correspondent aux dernières pluies simulées. Le graphe construit est proche de celui de Mojanda. En effet, on distingue également trois droites représentant le comportement de chacune des situations étudiées. La droite à la plus forte pente unit les points qui représentent le premier labour, où globalement comme à Mojanda $F_n = 1$, puis vient celle qui souligne le comportement de F_n sur ancien labour et enfin on retrouve une droite légèrement inclinée par rapport à l'abscisse pour les valeurs de F_n sur sol nu.

Dans un état de sol saturé, à Mojanda comme à Vega Grande, ressort le bon comportement du premier labour par rapport aux autres situations. En outre, la pente de la droite représentant l'ancien labour et le sol nu est plus forte à Vega Grande, ce qui traduit des valeurs plus élevées de F_n et corrélativement un ruissellement plus faible. Cela laisse supposer qu'il existe une différence de comportement entre l'andosol de Mojanda et le sol non volcanique de Vega Grande. Cet aspect sera traité par la suite dans la partie consacrée à l'effet sol.

De ce type de graphe on peut déterminer aussi, par lecture directe, le seuil d'intensité de pluie minimale nécessaire à l'apparition du ruissellement, quelle que soit la durée de la pluie (LAFFORGUE, 1977 ; VALENTIN, 1985). Ce seuil correspond au point d'intersection entre les droites « ancien labour », « sol nu » et « premier labour ». Cette lecture directe sur les graphes 25 et 26 donne les informations suivantes : pour le labour ancien, 15 mm h⁻¹ à Mojanda et 30 mm h⁻¹ à Vega Grande ; pour le sol nu, 10 mm h⁻¹ sur les deux stations. Ces données représentent assez bien ce qui se passe sur les autres stations à la lecture des graphes correspondants : pour le labour ancien, de 15 mm h⁻¹ à 20 mm h⁻¹ sur les sols andiques et le ranker de Jadan ; pour le sol nu, de l'ordre de 10 mm h⁻¹ sur les sols andiques de Tumbaco et le ranker de Jadan, 18 mm h⁻¹ sur l'andosol de Riobamba. Seul se distingue le sol vertique profond de Ventanas, où les valeurs sont égales à 0 pour le labour ancien et à 30 mm h⁻¹ pour le sol nu.

En synthèse, en prenant en compte des variables telles R_{max} , et F_n , voire P_i , qui définissent la dynamique de l'eau dans et sur le sol, il ressort par rapport aux trois situations étudiées et quelle que soit la station que le

premier labour présente un comportement très peu érodible. Sa rugosité de surface, associée à une stabilité de surface peu dégradée et à la présence de racines non décomposées, le distingue nettement des autres situations et lui confère une capacité d'infiltrabilité et une disponibilité à rester ouvert plus élevées et corrélativement, une susceptibilité plus faible au ruissellement.

Le test le plus révélateur a consisté à essayer de saturer le sol pour obtenir des valeurs constantes de F_n . Dans ces conditions extrêmes de protocole où le sol est très vulnérable à la pluie, le premier labour est le seul cas où $F_n =$ intensité de la pluie.

On peut regretter de ne pas avoir de données issues de la station de Ventanas dans le cas du premier labour, pour des raisons techniques liées à un mauvais fonctionnement momentané de l'appareil durant les essais. On peut penser que ce sol vertique profond, qui se comporte positivement en situation d'ancien labour, présente un comportement tout aussi remarquable en situation de premier labour.

Pour les deux autres situations, comme on pouvait s'y attendre, le sol est d'autant plus sensible aux gouttes de pluie que l'état d'humidité tend vers la saturation et que l'intensité de la pluie est plus élevée. L'ordre de succession des pluies intervient également nettement. Les valeurs constantes de F_n sont obtenues avec la dernière pluie alors que le ruissellement continue de croître en fonction de l'augmentation de l'intensité qui entraîne une forte atténuation de la rugosité superficielle, allant jusqu'à la fermeture du sol. À ce stade, le sol nu et lisse est plus vulnérable que l'ancien labour.

Enfin, comme le montre la figure 24, l'effet situation culturale est nettement marqué au niveau des pertes en terre. Elles sont maximales sur sol nu puis sur ancien labour. Elles sont quasi inexistantes dans le cas du premier labour.

Plus les mottes sont grosses, plus le sol reste ouvert longtemps, plus il infiltre l'eau et moins il s'érode. En ce sens le premier labour, compte tenu de ses caractéristiques hydrodynamiques particulières et de sa faible susceptibilité au ruissellement, perd très peu de terre.

Pour apprécier l'effet sol, nous avons poursuivi notre analyse dans le même esprit en nous intéressant prioritairement aux données obtenues dans les conditions extrêmes de saturation du sol par la succession de plusieurs pluies. Seules les situations ancien labour et sol nu ont été retenues du fait que le premier labour se distingue par un comportement remarquable où $F_n = I$.

L'effet sol

Pour chaque station, on a élaboré une nouvelle série de graphes se rapportant à chacune de ces deux situations pour établir les variations de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol. Une intensité de pluie constante, IM 15 = 60 mm h⁻¹ a été choisie. Les pluies simulées sont placées en abscisse dans l'ordre de succession dans lequel elles ont été réalisées. La double ordonnée indique d'une part, à gauche, les valeurs de Fn et des intensités de pluies et d'autre part, à droite, les valeurs d'humidité du sol. À titre d'exemple nous avons reproduit ici le graphe de la station de Jadan (fig. 27).

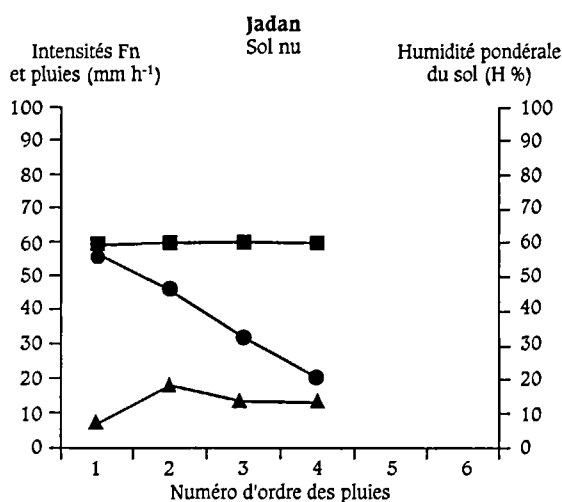
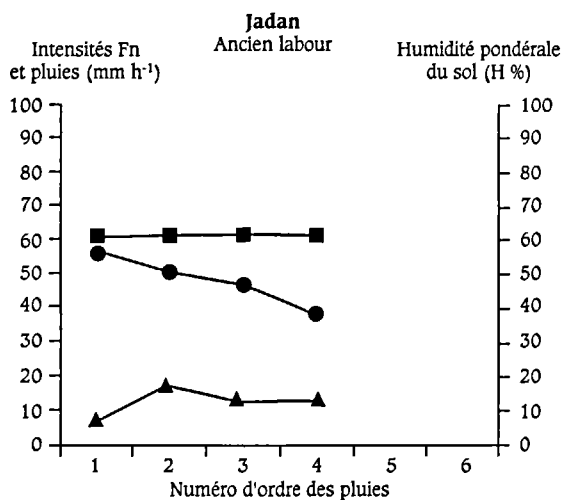
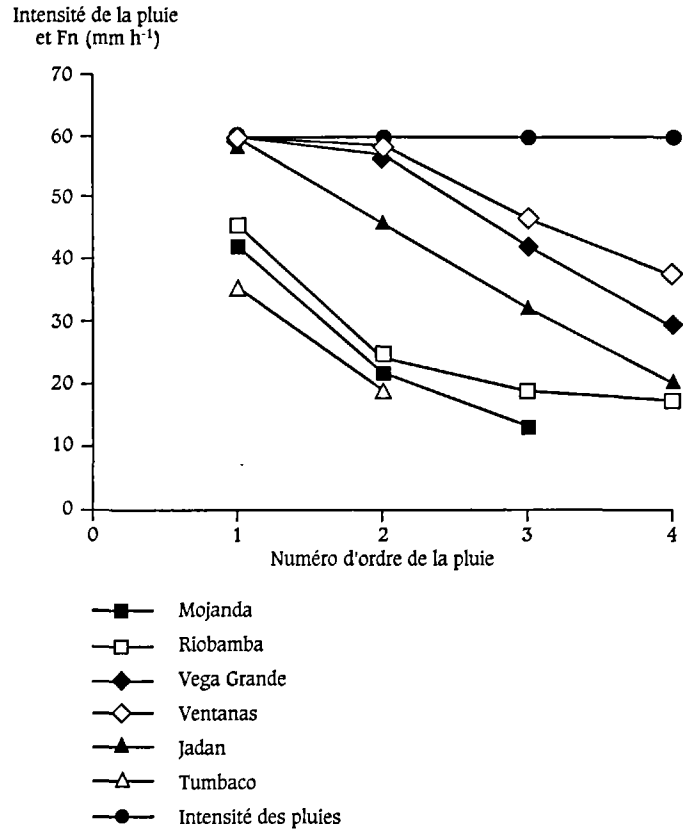


FIG. 27 — Variation de Fn en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol (Jadan). Pluies d'intensité de 60 mm h⁻¹, sol nu et ancien labour



● Fn
▲ H %
■ I Pluie

Fig. 28 — Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol sur les sept stations. Pluies d'intensité de 60 mm h^{-1} , sol nu



Ce graphe montre que les valeurs de F_n continuent à diminuer indépendamment des valeurs d'humidité qui ont atteint un seuil limite dès la deuxième pluie. Dans ce cas, on peut admettre que l'état d'humidité du sol n'intervient pas dans le processus observé et que les valeurs de F_n , qui traduisent des variations du mouvement de l'eau de haut en bas, sont dépendantes de l'évolution de l'état de surface du sol et de sa capacité à rester ouvert et à infiltrer une certaine quantité d'eau. À ce stade de la formation du ruissellement, l'énergie libérée par la pluie a un impact majeur sur la dégradation des états de surface et sur le bilan infiltration-ruissellement.

Pour pouvoir comparer, par rapport à ces mêmes variables, le comportement des sols de toutes les stations, on a regroupé les données sur un seul graphe (fig. 28).

Ce graphe est construit comme le précédent : pour une pluie d'intensité constante ($IM 15 = 60 \text{ mm h}^{-1}$) ont été indiquées en abscisse la succession

des pluies et en ordonnée les valeurs de F_n et d'intensité de la pluie. Afin de pouvoir apprécier au mieux l'effet sol, nous avons retenu seulement la situation du sol nu afin d'éliminer la perturbation introduite par le travail du sol dans le cas de l'ancien labour. Pour faciliter la lecture de ce graphe, les valeurs d'humidité n'ont pas été prises en compte, elles sont supposées constantes. Deux groupes en ressortent :

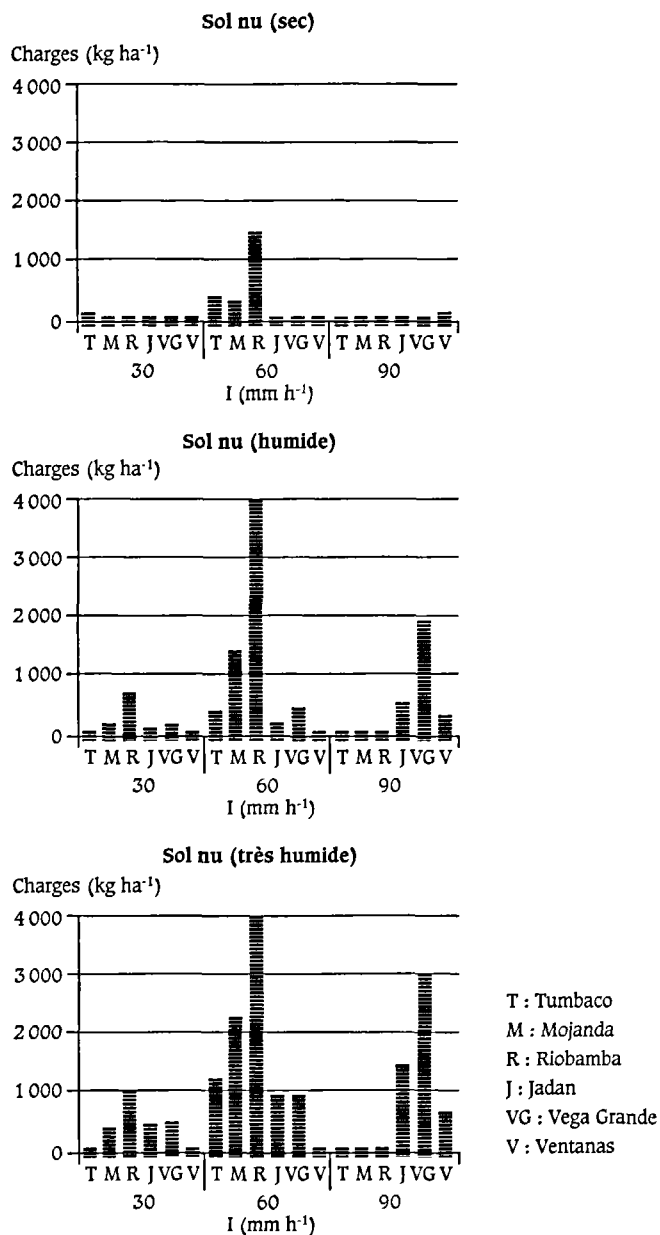
- en haut du graphe, un premier groupe associe les sols vertiques de Ventanas et Vega Grande. Légèrement décalé se trouve le ranker de Jadan. Selon les travaux de POESEN (1987 b) et de CASENAVE et VALENTIN (1989), si la surface du sol contient des graviers ou des fragments de roches, ces derniers protègent le sol contre le splash des gouttes de pluies et permettent le maintien d'une certaine macroporosité sous-jacente. Dans ce cas, leur influence est positive sur l'infiltration, comme nous l'avons observé à Jadan. En revanche, lorsque ces éléments sont inclus dans les croûtes de sédimentation ou de battance, on observe une augmentation du ruissellement ;
- en bas du graphe apparaît un second groupe composé par les andosols des stations de Riobamba, Mojanda et Tumbaco.

Les valeurs de F_n sont plus élevées et celles de R_{max} plus faibles dans le premier groupe. Selon notre hypothèse, ces variations à humidité constante traduisent l'influence des réaménagements des états de surface. Autrement dit, les sols du premier groupe ruissellent moins et infiltrent plus parce qu'ils se ferment plus lentement. En comparaison, les sols andiques du second groupe se ferment plus rapidement, ce qui exprime une plus forte sensibilité à la détachabilité et à l'exportation des particules de sol hors de la microparcelle. Dans ce cas, la donnée « charges » est la variable qui illustre le mieux les variations observées. Le graphe de la figure 29 met en évidence l'exportation des charges (kg ha^{-1}) pour les trois états hydriques et pour les IM 30 et 60, les IM 90 des stations volcaniques n'étant pas disponibles. Les sols andiques se distinguent par des pertes en terre plus élevées, qui peuvent atteindre des valeurs comprises entre 4 t ha^{-1} et 9 t ha^{-1} : le site de Riobamba est le plus érodible², il est suivi par celui de Mojanda. Par comparaison, les sols non andiques perdent moins de terre et le sol de Ventanas se distingue par une remarquable stabilité quels que soient les essais.

² Par rapport aux résultats obtenus sur parcelles de ruissellement (tabl. X), l'érosion est plus élevée sous pluies simulées à Riobamba que sur les autres stations. Le fait de simuler une pluie d'intensité plus élevée que les pluies naturelles est un élément qui doit également être pris en considération.

L'effet sol est donc réel. La présence de fentes avant saturation du sol et une pierrosité élevée sont des facteurs importants qui distinguent les sols vertiques du Sud des sols volcaniques de la Sierra du Nord, et qui influent fortement sur leur capacité d'infiltration. La texture est un autre facteur à examiner. Différents essais de régression ont été menés entre

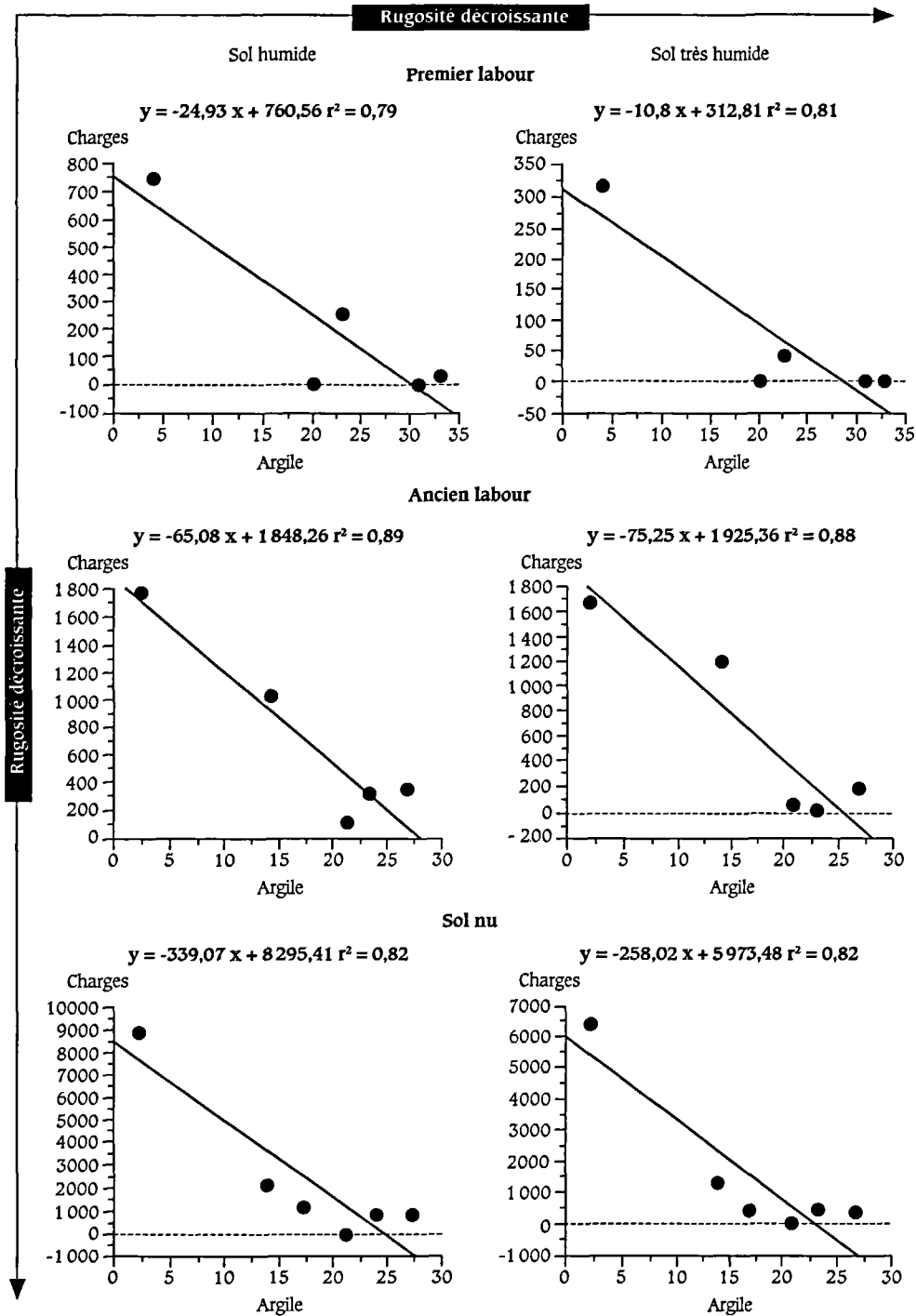
FIG. 29 — Simulation de pluies sur sol nu. Variation des charges (kg ha⁻¹) en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm h⁻¹)



les charges exportées, variable qui traduit le mieux les réaménagements de surface, et les variables disponibles se rapportant aux constituants du sol (texture, matière organique) et à leur densité apparente. La meilleure corrélation obtenue correspond à l'argile, qui explique dans tous les cas 80 % des variations de l'érosion, significative au seuil de 1 %. Autrement dit, plus le sol est argileux, plus il est résistant à l'impact des gouttes de pluie.

Fig. 30 — Régressions entre charges (kg ha^{-1}) et argile (%).
I = 60 mm h^{-1}

La figure 30 présente des régressions exprimant les essais menés avec $\text{IM } 15 = 60 \text{ mm h}^{-1}$, pour les trois situations, sur sol humide – r^2 est compris entre 0,79 et 0,89 – et sur sol très humide – r^2 est compris entre 0,81 et 0,88.

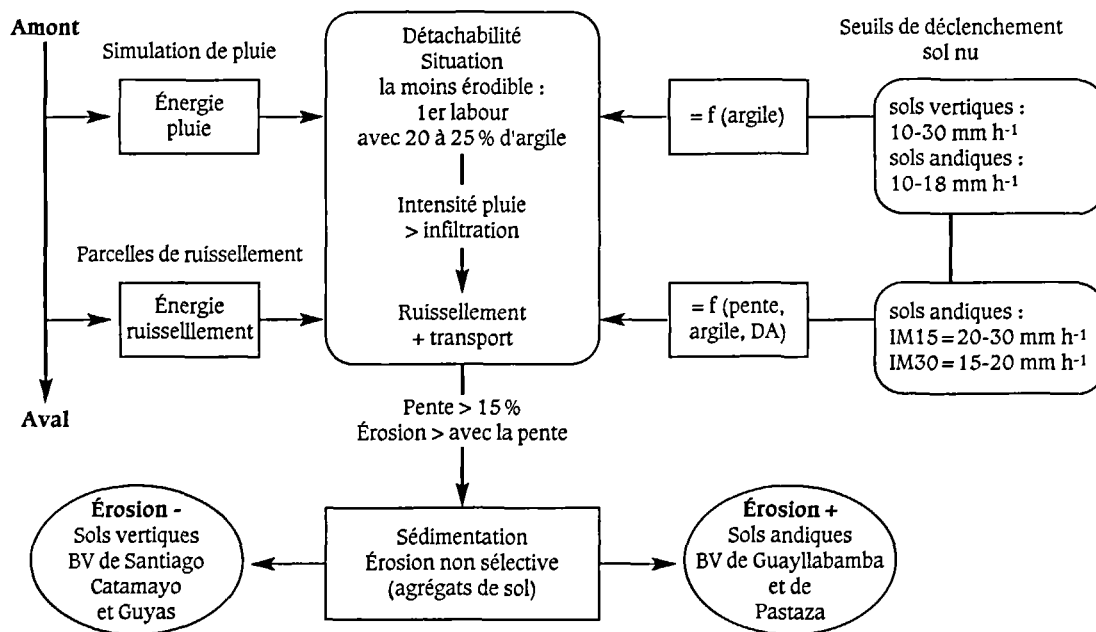


Ces valeurs démontrent le rôle essentiel de l'argile dans le processus de naissance du ruissellement par rapport aux autres variables. Son taux plus élevé dans les sols vertiques est un critère significatif qui participe aux différences de comportement relevées sous pluies simulées entre ces sols et les andosols.

Les mesures effectuées sous pluies naturelles et sous pluies simulées apportent des éléments de réponses utiles à la compréhension de l'érosion accélérée dans les Andes de la Sierra et à la lutte contre ce phénomène. Ces deux approches s'avèrent très complémentaires parce qu'elles permettent d'apprécier les deux processus essentiels qui interviennent dans la dynamique de l'érosion – la détachabilité grâce à la simulation de pluies et l'érosion linéaire grâce aux parcelles de ruissellement.

Par ailleurs, la simulation de pluie permet d'isoler un effet « sol » indépendamment de l'effet « pente » qui n'est pas significatif sur une microparcelle de 1 m². En comparaison, cet effet « pente » est pris en compte par les parcelles expérimentales dont les longueurs de pente sont comprises entre 20 et 50 m. Enfin, il est possible dans quelques cas de comparer leurs résultats respectifs.

L'érodibilité des andosols



Tabl. XII — Synthèse des résultats des parcelles de ruissellement et des simulations de pluies

Ce schéma, organisé en fonction de la pente du versant, indique l'apport de chacune des deux expérimentations. La simulation de pluie permet d'étudier la naissance du ruissellement qui est à l'origine de l'érosion accélérée, elle se place à « l'amont » du schéma. Les données recueillies mettent en évidence le rôle de l'argile dans la résistance du sol à la détachabilité et à l'énergie des gouttes de pluie : le seuil d'intensité minimale de pluie requise pour déclencher le ruissellement sur sol nu est compris entre 10 et 30 mm h⁻¹ sur les sols vertiques et le ranker argileux et entre 10 et 18 mm h⁻¹ sur les sols andiques.

Une fois le ruissellement amorcé, l'érosion linéaire prend le relais et se développe sur le versant. Les parcelles de ruissellement ont permis de préciser son action. Au-delà de 15 % de pente, l'énergie du ruissellement devient supérieure à celle des gouttes de pluie. L'érosion n'est plus alors fonction de l'intensité de la pluie mais de la pente, dont les variations d'inclinaison expliquent au moins 60 % de celles de l'érosion. Ce résultat a pu être amélioré par le calcul d'une régression multiple où sont associées les variables « pente », « argile » et « densité apparente » : on parvient ainsi à expliquer plus de 90 % de la variance. L'association de ces trois variables traduit l'action de l'érosion linéaire aux dépens des agrégats du sol dont l'entraînement sur le versant est d'autant plus facile qu'ils sont peu denses et donc sensibles à la flottaison. L'absence de sélectivité texturale notée dans les sédiments érodés renforce cette hypothèse. Pour les sols andiques, le seuil de déclenchement de l'érosion linéaire nécessite une pluie d'intensité minimale de 20 à 30 mm h⁻¹ pour l'IM 15 et de 15 à 20 mm h⁻¹ pour l'IM 30. Faute de séries de données homogènes, ce seuil n'a pu être déterminé pour les sols non volcaniques des autres stations.

Le fait d'utiliser la variable « argile » dans deux régressions qui tentent d'expliquer, pour l'une, la résistance du sol à l'énergie de la pluie et, pour l'autre, la vulnérabilité du sol à l'énergie du ruissellement ne semble pas contradictoire, dans la mesure où les processus mis en cause interviennent à des niveaux différents. Dans un cas, plus les particules de sol sont agrégées par l'argile et plus le sol résiste à l'impact de la pluie ; dans l'autre cas, l'argile n'est plus considérée comme un élément de résistance à la pluie car plus la pente croît, plus l'énergie du ruissellement favorise l'érosion, moins cette dernière est sélective et plus le sol est décapé sous forme d'agrégats.

Néanmoins, ces deux processus ont une incidence l'un par rapport à l'autre, dans la mesure où plus un sol est agrégé et résistant à la détachabilité, et plus le seuil de déclenchement du ruissellement est retardé.

Les sols des stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas démontrent une sensibilité à l'érosion plus faible que les sols andiques des stations de Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba, notamment lorsque ces derniers sont mis en culture. Autrement dit, dans l'hypothèse de conditions de pente et d'agressivité climatique égales, un secteur mis en culture dans le grand bassin de Guayllabamba ou de Pastaza présentera des risques d'érosion accélérée plus élevés qu'un secteur également cultivé dans les bassins de Santiago, Guayas ou Catamayo.

En général, l'andosol est considéré comme un sol résistant à l'érosion en conditions naturelles. En revanche, lorsqu'il est cultivé, sa capacité de rétention de l'eau diminue et son comportement physique se modifie radicalement. À l'état sec, il perd sa consistance et devient facilement friable et pulvérulent en raison d'un processus de déshydratation irréversible. COLMET-DAAGE *et al.*, 1967-1969, QUANTIN (1992b), ALBRECHT *et al.* (1992) ont observé ce processus sur des andosols des Antilles, du Nicaragua, d'Équateur et des Nouvelles-Hébrides. En laboratoire, des essais menés pendant plusieurs mois par Colmet-Daage pour réhumecter un échantillon d'andosol séché à l'air n'ont pas abouti. Pour lui, la présence de fortes quantités d'eau dans l'andosol permet le maintien d'une structure distendue qui s'effondre lorsque survient une dessiccation poussée à l'air. Pour QUANTIN (1994), le retournement et l'ameublissement par le labour d'une tranche de sol de 0,20 à 0,30 m d'épaisseur sont suffisants pour provoquer la dessiccation du sol et sa déshydratation irréversible. La texture se comporte alors comme un pseudo-sable très sensible à l'érosion. D'autres travaux montrent que ce processus peut agir négativement sur la fertilité chimique du sol. Par exemple SHERMAN *et al.* (1964) ont remarqué une diminution sensible de la valeur de capacité d'échange mesurée sur andosol séché à l'air par rapport à celle mesurée sur sol humide, de l'ordre de 30 % à 90 %.

Sur le sol nu, dont le comportement a été étudié sur les parcelles de ruissellement et sous pluies simulées, les résultats montrent que les pertes en eau et en terre sont toujours plus élevées que sur sol labouré et planté. Ce constat est d'autant plus préoccupant que chaque année, au cours du cycle cultural, le sol est nu dans la période située entre la récolte et avant que le semis ne lève. Sur sol nu, les pertes en terre par détachabilité atteignent des valeurs élevées, par exemple à Riobamba, où les pluies simulées ont provoqué une érosion de l'ordre de 6 000 à 9 000 kg ha⁻¹, avec IM 15 = 60 mm h⁻¹ sur sol humide et très humide. On relève la même dynamique sur les parcelles de ruissellement où l'érosion linéaire a provoqué des pertes en terre moyennes comprises entre 50 et

130 t ha⁻¹. Les valeurs les plus basses ont été enregistrées à Cangahua et à Ventanas, avec respectivement 50 et 60 t ha⁻¹, ce qui représente tout de même une érosion importante : si on suppose une densité apparente moyenne des sols secs de l'ordre de 1, une tonne de matériaux érodés par hectare et par an est équivalente à une lame de sol érodée de 0,1 mm, soit une lame de 5 mm pour une érosion de 50 t ha⁻¹ à Cangahua et de 6 mm pour une érosion de 60 t ha⁻¹ à Ventanas, avec des précipitations plus de trois fois plus élevées sur le sol vertique de Ventanas qu'à Cangahua.

Compte tenu de ces résultats, la lutte antiérosive devra donc s'attacher à :

- améliorer l'infiltration de l'eau par le travail du sol, afin de retarder la naissance du ruissellement. L'ancien labour est plus vulnérable que le premier labour, notamment sur sol nu lorsque le semis n'a pas encore levé ;
- agir sur la pente du versant, par des ouvrages permettant de dissiper l'énergie du ruissellement et de retarder ou, mieux, d'éviter la concentration des filets d'eau, lorsqu'il y a refus du sol à infiltrer et mise en mouvement de la nappe d'eau en surface.



La lutte antiérosive dans les Andes équatoriennes

De l'expérimentation à l'application

La lutte antiérosive : mythe ou réalité ?

À ce stade, notre recherche a permis d'analyser, qualitativement et quantitativement, les principaux aspects de l'érosion des sols cultivés dans la Sierra de l'Équateur et de préciser l'impact de l'anthropisation, qui est à la mesure de l'impact concomitant de l'environnement physique de la montagne andine. À l'échelle planétaire, les Andes constituent un énorme bourrelet montagneux très original par ses altitudes, par son volume rocheux mais aussi par ses densités humaines. À l'instar d'autres montagnes tropicales comme les chaînes de l'Himalaya, d'Afrique de l'Est et d'Asie, le milieu se caractérise par un équilibre morphodynamique fragile en conditions naturelles et par des risques érosifs élevés en conditions anthropiques, ces derniers tendant inexorablement vers l'aggravation s'il n'y a pas de véritable politique de lutte antiérosive.

Notre analyse est donc parvenue au constat que l'homme contraint un milieu qui, en retour, perturbe le développement des activités humaines par ses fortes contraintes physiques, ce qui nous a conduit à formuler des principes directeurs de lutte contre l'érosion. Retarder la naissance du ruissellement, intervenir sur l'inclinaison des versants, sensibiliser le paysan à la lutte antiérosive et l'inciter à agir durablement sont les principales recommandations qui ressortent de l'analyse à ce stade du programme.

Néanmoins, s'en tenir à un tel constat fait de recommandations, non validées sur le terrain, n'aurait pas répondu à la demande de notre partenaire en quête de solutions pratiques et efficaces. Alors comment faire pour dépasser ce stade, afin que la recherche se prolonge en

évoluant vers la lutte antiérosive et pose les fondements d'actions concrètes de terrain dans le minifundio, et ce avec la participation des hommes qui y vivent ?

Les fondements généraux de la démarche participative

À la suite de l'analyse des causes des échecs des programmes de lutte antiérosive et de la naissance au plan international du concept de développement durable (cf. chap. II), une question se pose : pourquoi continuer à lutter contre l'érosion dans un cadre tel que les résultats obtenus sont mitigés ? Les techniques empiriques développées par les sociétés anciennes ne sont plus adaptées, les projets techniques d'aménagement d'origine étatique ne répondent qu'à une partie des



La démarche participative est mise en œuvre dès le début du programme. Après concertation avec les paysans, les stations sont installées sur les terres du minifundio et elles sont gérées en équipe. Ici, dans la dépression pyroclastique, les paysans de la commune de Chuspiaco, où se trouve la station de Tumbaco (pente de 20 %, 2 600 m d'altitude), participent à l'installation du site où seront logés les bacs de décantation des parcelles expérimentales.

problèmes et la recherche, pourtant de plus en plus précise et spécialisée, ne s'intéresse qu'aux processus.

La lutte antiérosive a donc toutes les apparences du mythe, alors qu'elle peut devenir une réalité si elle est menée en concertation avec les paysans et s'ils participent aux différentes opérations, ce qui a été jusqu'à présent négligé.

La démarche participative se propose de combler cette grave lacune. Ce n'est pas un concept vague répondant à une opportunité du moment, mais la réponse concrète d'un groupe de chercheurs et de techniciens expérimentés soucieux d'appliquer le concept de développement durable dans le domaine de la lutte antiérosive. La primeur en revient à nos collègues anglo-saxons qui définissent la démarche participative par le vocable de « Landhusbandry » (SHAXSON *et al.*, 1989 ; HUDSON, 1992), repris en français par ROOSE (1994) sous le sigle de GCES : « Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols ».

À la différence d'autres stratégies, cette démarche part du constat que les paysans sont prêts à investir sur les bonnes terres où existent des risques potentiels de dégradation, et non sur les terres déjà très érodées et trop appauvries (ROOSE et DE NONI, 1998). En effet, plutôt que de mettre en défens des terres dégradées pour réduire les transports solides des rivières et de construire des terrassements pour gérer les eaux de ruissellement, il est préférable d'investir en priorité sur les terres qui ont encore un potentiel pour faire fructifier les investissements fonciers susceptibles d'intensifier la production, selon le principe « mieux vaut prévenir que guérir ». Les décisions ne sont prises qu'avec la compréhension et l'accord des intéressés. L'objectif n'est plus la conservation des sols pour elle-même, mais la valorisation durable du travail et de la terre à l'échelle d'une communauté rurale ou d'un terroir. Le changement des systèmes de production exige du temps, car les habitudes sont à modifier en fonction des réalités socio-économiques : rien ne sert de se lancer dans la construction d'un réseau de dispositifs antiérosifs si ceux-ci ne sont pas acceptés et intégrés par les utilisateurs des terres.

La démarche participative se définit donc en fonction des points suivants :

- principes : la réussite d'un aménagement antiérosif ne peut être durable sans la participation paysanne depuis la conception du projet et sans l'intégration des contraintes socio-économiques et de la mentalité paysanne dans la démarche scientifique. Le principe de base en est que les paysans n'acceptent un surcroît de travail que s'ils constatent une amélioration de la productivité du travail et de la terre ;



La mise en terre des semences est un des temps forts dans l'installation des stations.

Ce moment est vécu à la fois avec passion et rigueur par les paysans. Ces deux photos illustrent le semis du maïs sur les stations, respectivement de Tumbaco et de Cangahua.

Selon un principe ancestral et cadencé, le paysan muni d'un bâton fait un trou dans le sol où il introduit 3 graines de maïs et une graine de haricot qui utilisera la tige de maïs comme tuteur.

La démarche participative en Équateur

- objectifs : le défi à relever dans les vingt années à venir, c'est à la fois de réduire les risques de ruissellement, d'érosion et de dégradation des sols, et de doubler la production avant que ne double la population (rythme démographique actuel des populations vivant sous les tropiques) ;
- méthode : pour cela il faut, d'une part, analyser les liaisons étroites entre les systèmes de production, les itinéraires techniques et les manifestations d'érosion ; d'autre part, intensifier le système de production, en favorisant l'infiltration et la couverture végétale du sol aux époques de fortes averses et en gérant à la fois l'eau, la biomasse et les nutriments organiques et minéraux disponibles en fonction des besoins des cultures ;
- réalisation : comme la plupart des projets, cette stratégie requiert trois étapes : 1) une période de sensibilisation des populations fondée sur des recherches préalables concernant la typologie des problèmes d'érosion, les facteurs accentuant les risques érosifs et la détection de possibles mesures antiérosives ; 2) une expérimentation démontrant sur les champs des paysans les risques réels de dégradation, l'efficacité des méthodes antiérosives proposées, la faisabilité et la rentabilité des améliorations à venir ; 3) une période d'extension spatiale des méthodes sélectionnées, des parcelles à l'ensemble du terroir.

Au moment où se déroule notre programme, il n'y a aucun exemple connu de démarche participative dans la lutte contre l'érosion des sols de la Sierra. Par ailleurs, comme nous l'avons déjà signalé, il n'y a pas davantage de repères historiques sur lesquels se fonder pour proposer une stratégie convaincante : la pression démographique actuelle n'a plus rien à voir avec la population existante à l'époque incaïque, les pratiques qui donnaient satisfaction aux anciens ne sont plus adaptées aujourd'hui ; l'agriculture de bassins et de vallées développée par la suite par les Espagnols est également très différente de celle du minifundio, dont les productions s'étagent de bas en haut des versants. Alors comment poser les bases d'une lutte antiérosive participative efficace dans un pays où une partie importante de la population paysanne de la Sierra a été regroupée sur des versants de plus en plus cultivés mais difficiles à valoriser véritablement à cause de la topographie, du froid et de l'altitude ?

Nous nous en sommes tenus aux principes de « Landhusbandry » ou GCES définis ci-avant.

Intervenir sur le ruissellement

Dans un premier temps, devant l'absence de stratégies traditionnelles pouvant répondre aux problèmes posés par la situation actuelle, les résultats issus de la phase initiale de recherche ont été déterminants pour dégager quelques grands principes de lutte antiérosive correspondant à un milieu tropical de montagne densément peuplé. Ceux-ci ayant montré la prédominance de l'érosion des sols par ruissellement, l'objectif est donc, d'une part, d'intervenir sur le partage de l'eau de pluie entre infiltration et ruissellement pour diminuer les quantités et ralentir la vitesse des flux d'eau susceptibles de s'écouler sur le versant ; et, d'autre part, de ralentir et de dissiper l'énergie du ruissellement une fois que les écoulements se sont organisés sur le versant.

Pour pouvoir jouer sur le bilan infiltration/ruissellement, autrement dit sur la fonction de production du ruissellement, l'élément essentiel, à la portée du paysannat local, est le travail du sol visant à améliorer l'infiltration de l'eau. Dans le minifundio, le tracé des billons est très rarement isohypse, la pénibilité du travail sur versants favorisant le labour dans le sens de la plus grande pente. En outre, les opérations de sarclage sont effectuées trop rapidement et irrégulièrement, ce qui laisse peu de temps pour retravailler le sol et façonner correctement de nouvelles buttes au pied de la plante. Dans tous les cas, les billons ne sont pas refaits au cours du cycle cultural.

Pour corriger ce type de pratique et d'habitude, qui concerne toutes les cultures (maïs, pomme de terre et fève, seule l'orge qui est cultivée à plat échappe à cette pratique), le travail de la surface du sol par un billonnage profond et isohypse a été préconisé. Les travaux de sarclage et de buttage ont également fait l'objet d'une attention spécifique. Ils doivent être réalisés avec soin et répétés au moins trois fois au cours du cycle cultural. C'est ainsi l'occasion de retravailler en particulier les billons, dont la forme s'émousse jusqu'à disparaître presque totalement à mesure que se succèdent les pluies.

Avec le travail du sol, l'effet « couverture en surface » ou « mulch » a été estimé important pour protéger la parcelle de l'agression des gouttes de pluies. En général, après la récolte, le paysan laisse entrer les bêtes sur la parcelle pour manger les résidus de culture. Le sol est alors peu à peu mis à nu, mais aussi piétiné, ce qui provoque une pulvérisation de surface avec tassement en dessous, et bien entendu disparition de la quasi-totalité de la matière verte. À titre d'essai, l'entrée des animaux sur les parcelles de test a été interdite, et seule une partie des résidus a été prélevée afin que le sol ne soit jamais totalement nu entre deux semis.

Pour pouvoir intervenir sur l'action de l'énergie du ruissellement le long des champs cultivés et du versant, autrement dit pour essayer de contrôler

la fonction de transfert du ruissellement, le travail du sol ou l'effet « mulch » ne sont plus suffisants et il a été nécessaire de compléter l'effet de ces pratiques en recourant à l'installation d'ouvrages. Des ouvrages simples, adaptés aux paysages et aux traditions du minifundio, disposés perpendiculairement à la plus grande pente, ont été conçus pour freiner l'énergie du ruissellement et le transfert de l'eau vers le bas des pentes. L'objectif était d'étaler les eaux, si possible dans la phase d'écoulement en nappe, pour briser leur énergie et éviter que le ruissellement ne dépasse une vitesse de l'ordre de 25 cm par seconde, seuil au-delà duquel l'eau se concentre et érode le sol (HJULSTRÖM, 1935). Les matériaux utilisés pour réaliser ces ouvrages étaient nécessairement ceux qu'emploient traditionnellement les paysans dans l'édification des maisons, haies, murets, bandes de végétation, etc. et dont nous avons noté l'existence à mesure que nous établissions des liens de participation avec la population. En permettant de freiner par dissipation l'énergie du ruissellement, ces ouvrages favorisent le dépôt et l'accumulation des matériaux transportés par les eaux. Des « pseudo-terrasses » se forment ainsi progressivement et naturellement, le profil du versant se modifie progressivement et la pente générale diminue radicalement. Leur formation requiert donc peu de travail de la part de l'agriculteur, leur coût est faible et leur entretien facile, ce qui était bien le but recherché (BENNETT, 1939 ; LILIN, 1986 ; HUDSON, 1963,1992 ; ROOSE, 1994).

Une fois cette étape définie, il restait à déterminer une méthode de travail qui permettrait de tester l'efficacité des actions préconisées sur les fonctions de production et de transfert du ruissellement, avec la participation active des paysans. D'un point de vue scientifique, seule l'observation sur des parcelles expérimentales peut permettre de suivre et d'évaluer par des mesures l'effet de ces actions. Du point de vue de l'application, ces parcelles sont situées dans les stations existantes. En règle générale, l'assentiment des paysans à cette formule est assez positif, car ils sont conscients des risques élevés de dégradation qui pèsent sur leurs sols et de la nécessité d'une aide extérieure dont ils n'ont jamais bénéficié jusque-là.

Les nouvelles parcelles expérimentales¹ sont différentes des parcelles témoins décrites au chapitre iv. Ainsi, un couple de parcelles est présent sur toutes les stations.

Par rapport à la parcelle témoin, cette nouvelle parcelle est dite « améliorée » parce qu'elle présente un certain nombre de spécificités. Tout en conservant le type de culture locale et les principales opérations culturales utilisées traditionnellement, nous y avons introduit diverses techniques

Les parcelles expérimentales améliorées et démonstratives

¹ Par rapport aux parcelles témoins, toutes les parcelles améliorées sont travaillées, plantées et portent des ouvrages antiérosifs.

de lutte antiérosive. Elles portent essentiellement sur le travail du sol pour améliorer l'infiltration et sur la mise en place de petits ouvrages pour dissiper l'énergie du ruissellement. Compte tenu de l'avis des paysans, qui ne souhaitent pas un nombre trop élevé d'ouvrages qui réduiraient la surface consacrée à la culture, une distance moyenne de l'ordre de 10 à 12 m entre chaque ouvrage a été définie, ce qui donne un nombre de 3 ouvrages par parcelle. Dans la démarche participative qui est la nôtre, nous avons préféré, bien entendu, nous ranger à l'avis du paysan plutôt que de calculer cette distance par des formules qui ne prennent pas en compte un tel aspect.

La mise en place des ouvrages sur les parcelles a nécessité une surface plus grande que celle des parcelles témoins. Après plusieurs essais, nous avons opté pour une surface de 1 000 m², soit 50 m x 20 m, ce qui permet de prendre en compte les différents paramètres nous intéressant tout en s'affranchissant des effets de bordure. Nous n'avons pas recherché, cependant, une taille plus grande afin de ne pas créer un écart de surface trop important par rapport aux parcelles témoins et de ne pas biaiser les comparaisons entre parcelles.

Comme nous l'avions annoncé dans le chapitre IV, l'idéal aurait été de démarrer l'observation des parcelles expérimentales améliorées une fois l'étude des parcelles témoins terminée. Dans la pratique, cela aurait réclamé une période d'observation trop longue par rapport aux objectifs fixés par nos partenaires équatoriens. Aussi, les parcelles améliorées ont été installées quasi en même temps que les parcelles témoins, avec l'idée que leur dispositif pourrait évoluer au cours de l'étude, ce qui finalement ne fut pas nécessaire.

Nous avons ainsi pu suivre durant cinq années culturales complètes ce couple de parcelles, témoin et améliorée, et comparer par des mesures et observations leur comportement à l'érosion, condition essentielle pour pouvoir juger de l'efficacité pratique des actions préconisées.

Les résultats : l'expérimentation au service de la lutte antiérosive

L'expérimentation principale a donc été menée sur les parcelles de ruissellement améliorées qui portent des ouvrages de lutte antiérosive, basés essentiellement sur le travail du sol et l'inclinaison de la pente. Des pluies simulées ont été réalisées en complément, comme dans le cas des parcelles témoins.

Selon les caractéristiques des sites, différentes méthodes et matériaux ont été retenus pour l'édification des ouvrages conservatoires.

À Tumbaco, le choix s'est porté vers la méthode des bandes enherbées parce que la prairie à *kikuyu* (*Penisetum clandestinum*), relativement étendue dans le secteur, présente une remarquable faculté de colonisation des sols et de développement dans des conditions écologiques difficiles (présence de la cangahua et pluviométrie inférieure à 700 mm). On a donc installé sur la parcelle une bande de *kikuyu* et profité de cet essai pour tester – à titre expérimental – sur les bandes restantes deux autres types de graminées : le *pasto lloron* (*Eragrostis curvula*) et le *pasto azul* (*Dactylus glomerata*).

À Cangahua ont été aménagés des ouvrages isohypses constitués par des murets de bloc de cangahua et des haies d'arbustes (*chilca*, [*Spartium junceum*]). Ce sont des matériaux et des pratiques très utilisés dans cette région, même si le rôle qui leur est dévolu par les sociétés locales n'est pas à priori de lutter contre l'érosion. On a installé deux parcelles améliorées : sur l'une ont été placés des murs de blocs de cangahua dont l'induration

Les parcelles expérimentales améliorées

Le dispositif stationnel

La *chamba* est une motte de terre et d'herbe avec racine

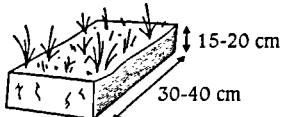


FIG. 31 — La pratique du muret de *chambas* (station de Mojanda)



Chaque étape de construction est composée de 2 rangées de *chambas* retournées et empilées l'une sur l'autre

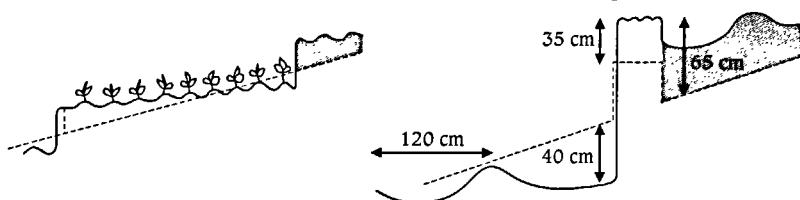
Mise en place des murets, 3 décembre 1986



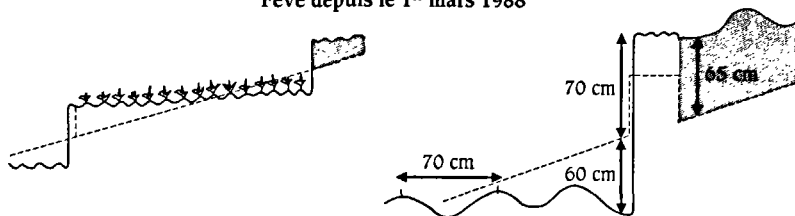
orge, du 4 décembre 1986 au 4 juin 1987



Pomme de terre (23 juillet 1987 au 13 novembre 1987) + 2 rangées de mottes



Fève depuis le 1^{er} mars 1988



Station de Mojanda : mise en place et évolution de la hauteur des murets qui passe de 0,30-0,35 m à 1,30 m, entre 1986 et 1988

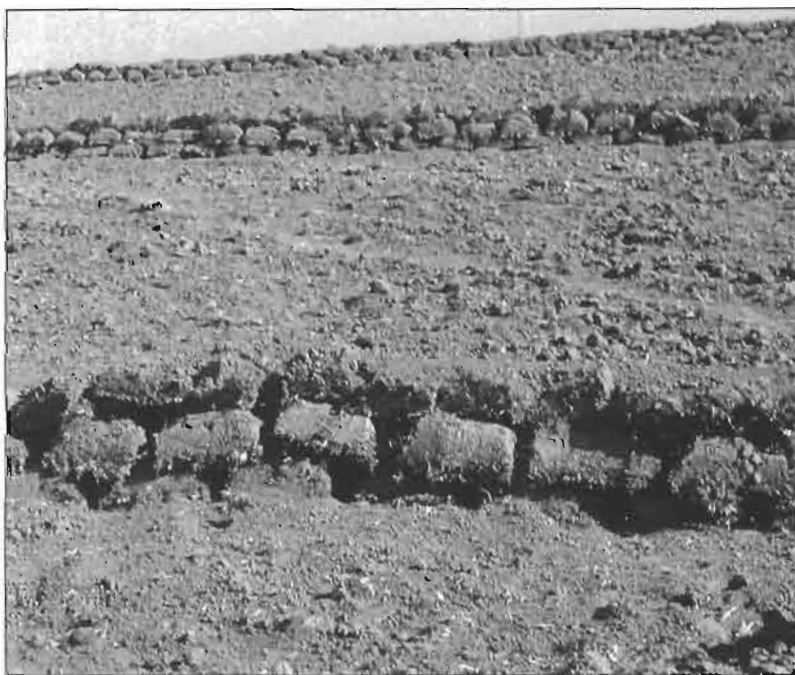
naturelle est propice à l'édification de talus évoluant en terrasses progressives ; tandis que sur l'autre, des fossés d'infiltration (rappelons que la zone de cangahua souffre d'un déficit hydrique chronique chaque année durant le cycle cultural) ont été creusés et associés à des haies de *chilca*, arbuste qui présente le double avantage d'être pâturable et de fixer par ses racines les bords du fossé. Placer sur le sol des cordons de pierres (blocs de cangahua) a également été envisagé mais cette méthode a été rapidement abandonnée car l'infiltration de l'eau dans le sol était insuffisante.

À Mojanda, l'environnement étant dépourvu de cailloux ou de matériau induré en raison de l'importante couche de pyroclastites, les agriculteurs utilisent la bande enherbée ou le muret formé de mottes de terre et d'herbe avec racines (*chambas* dans le langage local) pour cloisonner leurs parcelles. Nous nous sommes donc inspirés de cette tradition locale et nous avons installé deux parcelles améliorées, en plaçant : sur l'une, des murets de mottes d'herbe qui, retournées et empilées, ont permis de créer des terrasses perméables de construction progressive (fig. 31) ; sur l'autre, des bandes enherbées qui ont évolué progressivement en terrasses.

Sur cette ultime parcelle, à partir de la troisième année de suivi, lorsque l'accumulation de sédiments est devenue importante à l'amont de la bande, des mottes de terre ont été ajoutées à la partie supérieure de celle-ci. L'ouvrage initial a donc évolué vers une construction mixte, bandes plus murets en grosses mottes, bien adaptée aux conditions locales. Lorsque l'herbe a été correctement enracinée, une partie des mottes a été débitée directement à la base de la bande.

À Riobamba, où l'on manque aussi de matériaux résistants (cailloux ou blocs de sol induré), nous avons opté, comme à Mojanda et comme le pratique le paysannat local, pour la bande enherbée. Sur une seule parcelle, nous avons disposé des bandes isohypses composées alternativement par de la végétation naturelle (*Stipa ichu* du paramo, qui se trouve ici dans son étage écologique) et par du pâturage artificiel (*pasto azul* [*Dactylis glomerata*]). Par rapport à l'herbe du paramo, le développement du *pasto azul* a été assez médiocre ; le recours à un ouvrage mixte, bande plus muret comme à Mojanda, n'a pas été possible à cause de la mauvaise cohésion des particules du sol de la station (andosol vitrique) pour former des mottes.

À Jadan, Vega Grande et Ventanas, où les observations ont débuté plus tardivement, nous avons décidé, à la vue des résultats déjà obtenus, de tester sur chacune de ces stations une parcelle améliorée dotée de



Dans la Sierra volcanique, les pierres et les cailloux sont rares car les volcans ont émis essentiellement des cendres fines et meubles.

Aussi, les paysans ont recours à des matériaux originaux pour leurs constructions.

Ici, dans la région de Mojanda, les paysans fabriquent des murets en utilisant des mottes de terre et d'herbe avec racines appelées *chambas* dans le langage local. Il s'agit de sortes de « pavés » de 30/40 cm x 15/20 cm débités dans le sol avec l'*asadon*.

Sur l'une des deux grandes parcelles expérimentales de la station de Mojanda, les *chambas* sont employées pour édifier les ouvrages antiérosifs isohypses. La première année, le muret est composé seulement de deux rangées de *chambas*, retournées et empilées l'une sur l'autre, soit une trentaine de centimètres de hauteur.



Progressivement, les murets de *chambas* ont modifié la pente du versant en évoluant en terrasses progressives, qui permettent de ramener l'érosion à des valeurs faibles (moins de 1 t par hectare par an) et cela à des coûts raisonnables (moins de 2 000 F par hectare cumulés sur cinq ans).

bandes enherbées. La graminée retenue était le *pasto elefante* (*Pennisetum purpureum*). À Jadan, une seule parcelle améliorée a été installée. En revanche, à Vega Grande et à Ventanas, ce dispositif a été complété. Deux parcelles améliorées ont été ajoutées à Vega Grande pour tester l'action des fossés d'infiltration et des cordons pierreux. À Ventanas, une parcelle améliorée supplémentaire a été mise en place pour observer les effets dus au labour minimal associé à un désherbage chimique.

Pour chaque station, nous avons indiqué dans le tableau XIII pour toute la période (1986-1991) les valeurs moyennes des coefficients de ruissellement (KRM) en % et les pertes en terre (charges de fond plus suspension) en kilogrammes par hectare (kg ha⁻¹). Les aménagements antiérosifs sont également rappelés.

Les résultats des parcelles de ruissellement améliorées

*Des pertes en terre et en eau
réduites de façon
significative*

Stations	Aménagements antiérosifs	Parcelle am. 1 KRM (%)	Parcelle am. 1 érosion (kg ha ⁻¹)	Parcelle am. 2 KRM (%)	Parcelle am. 2 érosion (kg ha ⁻¹)
Tumbaco	bandes enherbées	2,1	4 476		
Cangahua	murets en P. 1 fossés en P. 2	0,2	266	0,2	373
Mojanda	murets en P. 1 bandes en P. 2	0,2	403	0,1	182
Riobamba	bandes enherbées	3,1	4 428		
Jadan	bandes enherbées	2,0	6 892		
*Vega Grande	bandes en P. 1 cordons en P. 2	1,9	12 701	1,3	14 328
Ventanas	bandes en P. 1 labour mini. en P. 2	6,2	6 986	7,2	18 989

Tabl. XIII — Ruissellement et érosion sur les parcelles améliorées (1986-1991)

* Une troisième parcelle améliorée a été installée pour tester l'effet de fossés d'infiltration isohypes, les résultats ont été : KRM % = 0,8 et kg ha⁻¹ = 5 648.

D'autre part, les données par année et par station sont exprimées par des histogrammes (fig. 32, 33, 34). Les histogrammes des parcelles témoins ont été ajoutés afin de permettre la comparaison et de juger de l'efficacité des méthodes testées pour diminuer les pertes en eau et en terre. Par station, les valeurs suivantes ont été obtenues :

- pour la station de Tumbaco (1986-1991), l'érosion moyenne et les KRM durant la période d'étude ont été respectivement de 4,5 t ha⁻¹ et de 2,1 % sur l'unique parcelle améliorée (bandes enherbées). En réalité, l'érosion sur cette parcelle a été moins élevée que ce que nous annonçons. La première mesure, effectuée en septembre 1986, correspond à un orage d'une exceptionnelle violence qui s'est abattu sur la station alors que l'installation des ouvrages conservatoires sur la parcelle améliorée n'était pas encore achevée. Si nous éliminons cette mesure, l'érosion moyenne pour la période est abaissée à moins de 0,8 t ha⁻¹ et le KRM à 1,8 % ;
- pour la station de Cangahua (1986-1991), l'érosion et les KRM ont été inférieurs à 0,4 t ha⁻¹ et de l'ordre de 0,2 % sur les deux parcelles améliorées (murets de cangahua et bandes enherbées) ;
- pour la station de Mojanda, l'érosion et les KRM sont également très faibles sur les deux parcelles améliorées, respectivement : 0,4 t ha⁻¹ et 0,2 % sur l'une ; 0,2 t ha⁻¹ et 0,2 % sur l'autre (murets et bandes enherbées) ;

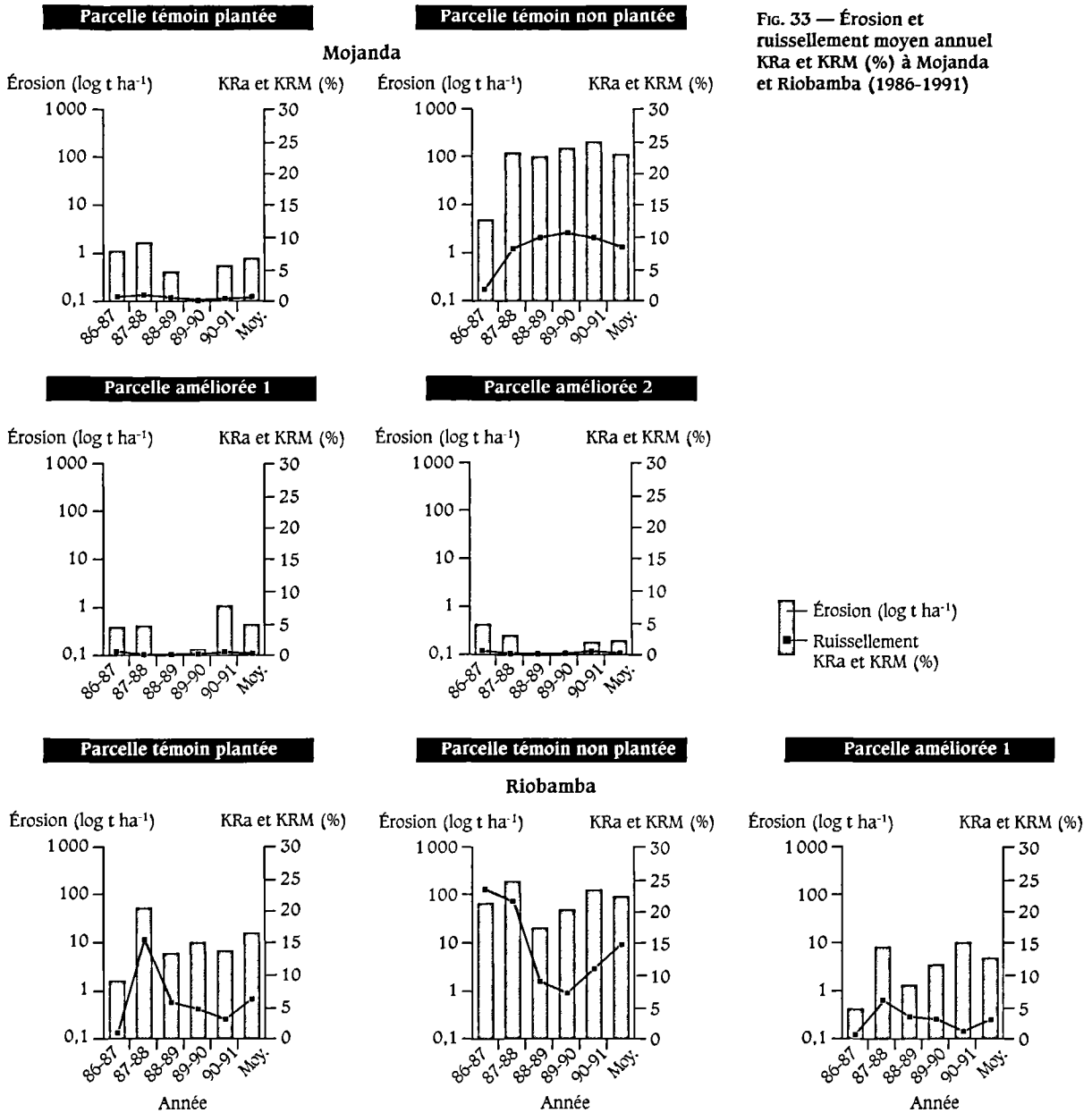


FIG. 33 — Érosion et ruissellement moyen annuel KRa et KRM (%) à Mojanda et Riobamba (1986-1991)

ont été plus intermittentes du fait de l'éloignement et de l'accès difficile des sites. À Vega Grande, où trois parcelles améliorées ont été installées, deux parcelles présentent des valeurs comprises entre 18 et 10 t ha⁻¹ (respectivement bandes enherbées et cordons pierreux), avec des KRM

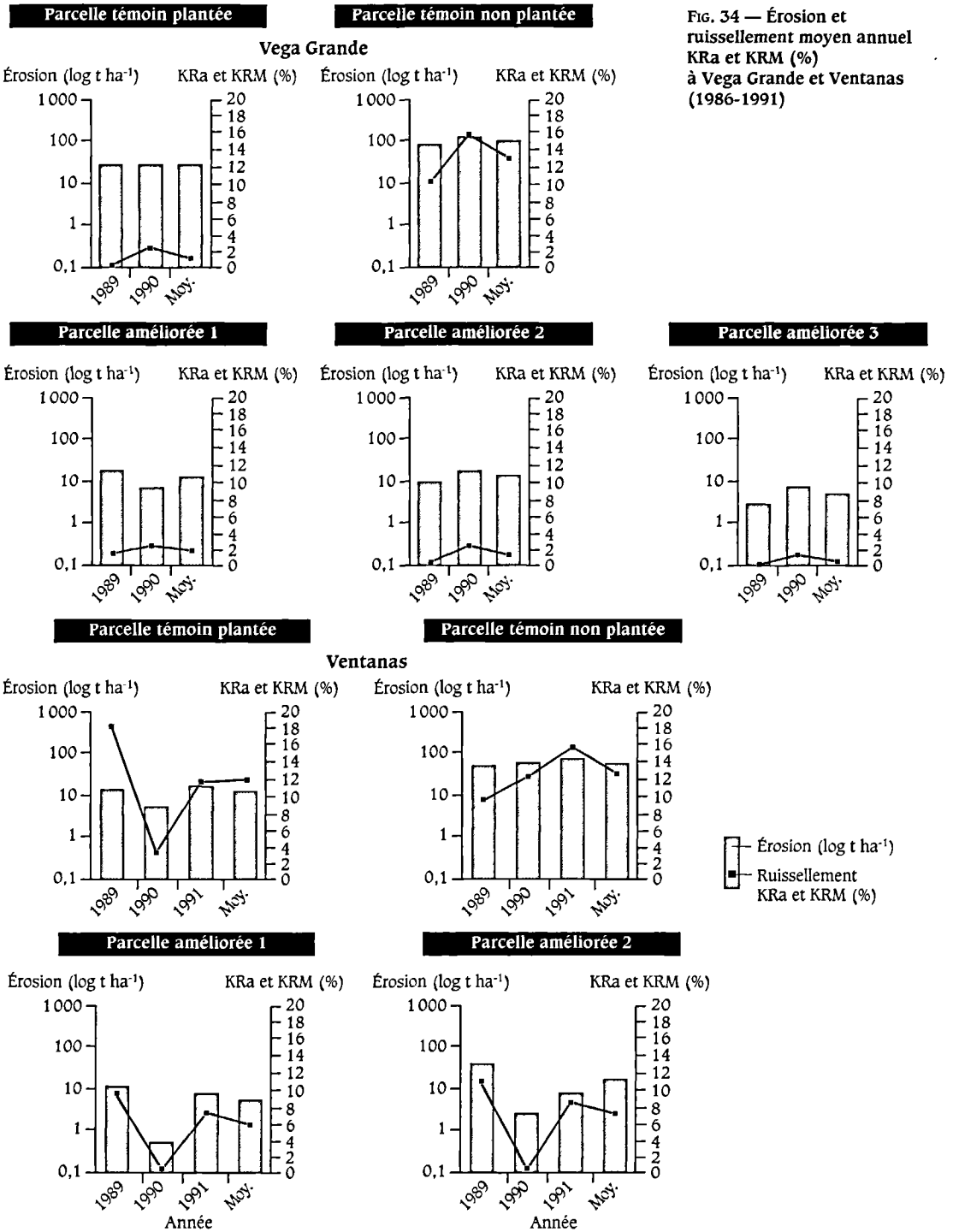


FIG. 34 — Érosion et ruissellement moyen annuel KRa et KRM (%) à Vega Grande et Ventanas (1986-1991)

inférieurs à 2 % ; seule la troisième parcelle (fossés d'infiltration) affiche un résultat satisfaisant de l'ordre de 3 t ha⁻¹ et un KRM de 0,3 %. À Jadan, on ne dispose que d'une seule parcelle améliorée pourvue de bandes enherbées : l'érosion relevée est de 7 t ha⁻¹ pour un KRM faible, de l'ordre de 2 %. Enfin à Ventanas, on a mesuré sur les deux parcelles améliorées qui composent la station 19 t ha⁻¹ de perte en terre (travail minimum du sol) pour l'une et 7 t ha⁻¹ (bandes enherbées) pour l'autre, avec des KRM de l'ordre de 6-7 % incluant des KRM max proches de 20 %.

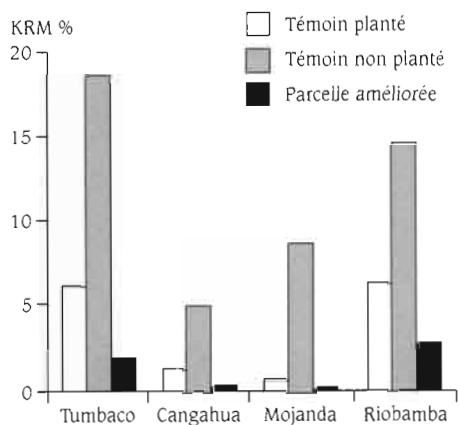
Comparées aux données obtenues en situations témoins (fig. 32, 33, 34), les mesures effectuées sur les parcelles améliorées démontrent l'efficacité des ouvrages conservatoires testés, notamment l'emploi de la bande enherbée. Dans tous les cas, les valeurs observées en situation améliorée se situent bien en deçà de celles enregistrées en situations témoins.

Les valeurs obtenues sur les stations de la Sierra du Nord, Tumbaco, Cangahua, Mojanda et Riobamba, où l'on dispose de valeurs moyennes correspondant à une série de données réparties régulièrement sur cinq ans, sont la preuve de l'excellent comportement des ouvrages testés (cf. fig. 35). C'est ainsi qu'à Tumbaco, les valeurs de l'érosion et du KRM enregistrées sur la parcelle améliorée sont beaucoup plus faibles que sur les autres parcelles : elles sont, respectivement, 120 fois et 9 fois moindres que sur le témoin non planté ; 24 et 3 fois moindres également que sur le témoin planté. Les rapports les plus élevés se situent à Cangahua et à Mojanda, où on trouve respectivement entre 135 et 720 fois moins de terre et entre 25 et 88 fois moins d'eau qu'en situation témoin non cultivé. C'est à Riobamba que les rapports sont les plus bas mais avec des valeurs néanmoins très significatives : l'érosion sur la parcelle améliorée est respectivement 20 fois et 4 fois moins importante que sur les parcelles témoins, avec des pertes en eau 2 à 5 fois plus faibles.

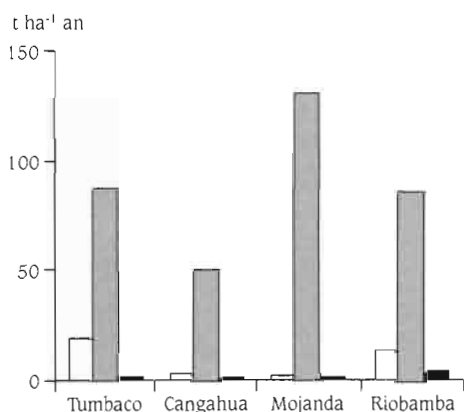
Si l'on passe d'une analyse des résultats globaux moyens pour la période à un examen année par année en se reportant à la dernière série d'histogrammes, il est intéressant de noter que les rapports qui donnent des valeurs maximales correspondent indifféremment à une année de faible ou de forte érosion, ce qui témoigne de l'efficacité des ouvrages testés. Par exemple à Cangahua, l'érosion sur la parcelle témoin non plantée est de 13,9 t ha⁻¹ en 1989-1990, ce qui est la plus basse valeur de toute la période ; parallèlement, l'érosion sur la parcelle améliorée n° 2 est quasi inexistante et estimée à 2 kg, soit 7 000 fois moins, autrement dit, le plus fort rapport pour toute la période. À Mojanda, pour une très forte

FIG. 35 — Variations du coefficient annuel moyen de ruissellement et de l'érosion pour les 4 stations et les trois situations culturales

Coefficients annuels moyens de ruissellement



Pertes en terre annuelles moyennes



érosion supérieure à 160 t ha⁻¹ en 1989-1990 sur le témoin non planté, la parcelle améliorée n° 2 s'érode 4 000 fois moins, ce qui est également le plus fort rapport enregistré pour toute la période. Sur la station de Riobamba, pour la période allant du 20 septembre au 12 novembre 1987 (date de semis), trois pluies érosives ont donné lieu à près de 34 t ha⁻¹ de terre perdue sur la parcelle témoin en culture traditionnelle alors que pour ces mêmes dates et pour un labour identique, l'érosion sur la grande parcelle améliorée n'est que de 1,1 t ha⁻¹.

Sur les trois autres stations (fig. 34), les mesures relevées se situent dans une fourchette de valeurs plus élevées (entre 7 et 19 t ha⁻¹) que sur les stations de la Sierra volcanique. Néanmoins, il ressort clairement que les



Dans d'autres régions de la Sierra volcanique, les paysans utilisent de simples bandes enherbées pour délimiter leurs parcelles. Leur rôle contre l'érosion est cependant limité car elles sont disposées selon la géométrie des parcelles et non selon les axes de fortes pentes qu'utilise préférentiellement le ruissellement. Dans plusieurs stations, on a testé ces bandes en les plaçant perpendiculairement à la pente et en utilisant le type d'herbe présent localement. La photo montre une bande enherbée de la station de Riobamba.



Après une année d'observation, lorsque la bande enherbée est bien implantée dans le sol, il est possible de débiter sur son bord aval des pavés de « chambas » qui sont disposées sur son bord amont. On revient alors au système du muret de « chambas » et à la construction de terrasses progressives. Ce type d'évolution est préconisé lorsque la pente dépasse 20 %. En deçà, la simple bande enherbée suffit à diminuer l'érosion.

parcelles améliorées s'érodent moins vite que les parcelles témoins, globalement entre 3 et 14 fois moins. Il est intéressant de noter les bons résultats obtenus avec la technique des fossés d'infiltration. Une solution mixte, associant bandes enherbées et fossés, devrait permettre d'abaisser l'érosion de manière sensible.

Dans les régions où la cangahua couvre des superficies importantes, les paysans utilisent en priorité ce type de matériau qui se débite en gros blocs. De la même façon que pour les *chambas*, les blocs sont déposés à la surface du sol selon les courbes de niveau. L'empilement de plusieurs rangées de ces blocs permet d'édifier des murets efficaces pour briser l'énergie du ruissellement. Progressivement, le versant aménagé de la sorte évolue en terrasses progressives comme dans les cas précédents et permet de contrôler l'alimentation hydrique de la plante.



Les pertes en eau ont également été réduites de façon significative. Hormis la station de Ventanas (KRM entre 6 et 7 %) où la pluviométrie annuelle est bien plus élevée que sur les autres sites, de l'ordre de 1 500 à 2 000 mm, ce coefficient ne dépasse pas 3 %. Dans le cas particulier de la Sierra, où l'eau dans le sol peut être insuffisante au cours du cycle cultural, réduire le ruissellement présente un réel intérêt pour contrôler l'alimentation hydrique de la plante et mener ainsi la récolte à terme.

Des rendements améliorés

Les observations menées sur les parcelles améliorées révèlent également la progression des rendements des cultures. De manière générale, on constate sur les stations une bonne relation entre la diminution des pertes en eau et en terre et l'accroissement de la production agricole. On peut citer l'exemple de Mojanda : la récolte de pommes de terre a été en moyenne de 4 t ha⁻¹ sur la parcelle témoin et de 8 t ha⁻¹ sur la parcelle améliorée ; la différence de rendement est encore plus nette pour la fève avec 1,1 t ha⁻¹ sur la parcelle témoin et 9 t ha⁻¹ en condition améliorée. Sur la portion de versant comprise entre deux murets, dont l'inclinaison initiale était de l'ordre de 40 %, la pente moyenne a diminué pratiquement de moitié, après trois années d'observation, du fait de l'accumulation de la terre derrière les ouvrages (cf. fig. 32). La pente la plus faible, voisine de 10 %, correspond aux 3 ou 4 derniers mètres qui jouxtent le muret, là où s'est accumulée la plus grande partie des particules du sol. C'est dans cette zone que les rendements les plus élevés par rang de culture ont été relevés.

Nos ouvrages antiérosifs adaptés aux conditions du minifundio

Nos observations confirment aussi l'adéquation socio-économique des ouvrages. À mesure que les parcelles améliorées étaient mises en place sur les stations, on a cherché à évaluer l'adaptabilité des ouvrages aux coutumes locales. Pour sensibiliser l'agriculteur à l'intérêt de ces techniques, outre leur efficacité pour lutter contre l'érosion, différents points ont été soulignés :

- les ouvrages évoluant progressivement et naturellement en pseudo-terrasses, le temps de travail consacré par le paysan à ce type d'activité est faible ;
- l'utilisation exclusive de matériaux autochtones permet au paysan d'acquérir rapidement la maîtrise nécessaire à la construction de ces ouvrages ;
- enfin, le coût d'installation et d'entretien des ouvrages est minimal. Il ne constitue donc pas un facteur limitant rédhibitoire pour le développement d'une stratégie durable de lutte antiérosive. L'évaluation des coûts durant la période des essais a permis de dresser le tableau xiv.

¹ Le revenu du paysan n'a pu être évalué de façon précise. Néanmoins, en conditions normales, la production agricole est essentiellement destinée à l'alimentation de la famille, et n'est pas toujours suffisante si les conditions climatiques sont adverses. En conditions améliorées, l'augmentation des rendements permet au paysan de dégager un surplus de récolte qui, vendu sur le marché de la ville proche, lui rapporte un bénéfice qu'il n'avait pas auparavant.

Pour les cinq années culturales considérées, les coûts globaux et cumulés sont très bas et varient entre 1 000 et 2 000 FF par hectare. On peut estimer que des investissements de ce type sont accessibles au paysan du minifundio, d'autant plus que ce dernier augmente ses bénéfices grâce à la hausse des rendements¹.

Cela étant, ces données n'ont qu'une valeur très relative, dans la mesure où le minifundio pratique de manière ancestrale le travail communautaire

Années	Talus en mottes herbeuses « chambas »			Murets en blocs de cendre indurée			Bandes enherbées	
	Nombre de jours/homme (j/h) types de travaux	Coût pour 20 m linéaires (sucres)	Coût/ha (sucres)	Nombre de jours/homme (j/h) types de travaux	Coût pour 20 m linéaires (sucres)	Coût/ha (sucres)	Nombre de jours/homme (j/h) types de travaux	Coût/ha (sucres)
1	1 j/h piochage 2 j/h pose de 2 rangs	2 625	131 250	2 j/h défonçage 3 j/h Tr. + pose de 2 rangs	4 375	218 750	3 j/h tracé des bandes et semis	46 000 dont 25 000 semences
2	idem	2 625	131 250	idem	4 375	218 750	2 j/h entretien + 3 coupes par an	84 000
3	1 j/h piochage 2 j/h pose de 1 rang	1 750	87 500	1 j/h défonçage 2 j/h Tr. + pose de 2 rangs	2 625	131 250		84 000
4	idem	1 750	87 500	idem	2 625	131 250		84 000
5	1 j/h entretien		21 000	1 j/h entretien		31 000		84 000
Coût total pour période			458 500 (1 310 FF)			721 000 (2 060 FF)		

j/h : jour/homme - Tr. : transport - 1 franc = 350 sucres (monnaie locale en 1991)

**Tabl. XIV —
Coûts de construction et
d'entretien des ouvrages**

qui permet de mobiliser un groupe de villageois pour des tâches d'intérêt général sur toutes les parcelles de la commune. Dans ce cas, le travail n'a plus de coût chiffré et l'investissement est quasi nul, ou réduit au minimum comme dans le cas des bandes enherbées où il se résume à l'achat de quelques semences.

Nos observations montrent, enfin, la faisabilité des méthodes préconisées dans les conditions du minifundio. Pour tester la faisabilité des méthodes, nous avons développé sur la station de Mojanda une opération de valorisation en vraie grandeur. Une trentaine de familles, sensibilisées par les résultats obtenus sur la station à proximité de leurs parcelles, se sont portées rapidement volontaires pour participer à cette action. Les principales règles de cette opération étaient les suivantes :

- une somme d'argent de 1 000 francs, remboursable au bout d'une année selon un taux d'intérêt faible (10 %), a été prêtée à chaque famille afin d'améliorer la qualité des intrants (achat de semences améliorées, d'engrais, etc.). Cette action a été d'autant plus populaire que les taux d'intérêt pratiqués en Équateur sont très élevés (supérieurs à 50 %) et inaccessibles aux paysans, alors que le taux que nous proposons était à leur portée ;

*Un essai de valorisation
en grandeur nature*

– pour accéder à ce prêt et démontrer ainsi leur motivation, les paysans s'engageaient à installer sur leurs parcelles les ouvrages conservatoires testés sur la station.

Deux ans de suivi ont établi que les paysans géraient sans problème particulier les ouvrages conservatoires, qu'ils étaient satisfaits des rendements obtenus et qu'ils respectaient avec régularité les échéances de remboursement du crédit.



La mise en place des pratiques antiérosives à l'échelle de la parcelle paysanne constitue l'un des objectifs fondamentaux de la démarche participative. La photo illustre le travail effectué sur leurs parcelles par les paysans vivant à proximité de la station de Mojanda. Encouragés par les bons résultats obtenus sur les stations, les paysans se sont engagés par contrat avec l'équipe à installer sur leurs parcelles les ouvrages antiérosifs. En contrepartie, ils ont bénéficié d'un prêt permettant d'acquérir les intrants nécessaires pour améliorer la fertilité du sol et la qualité des semences. Au remboursement, au bout d'un an, le prêt va à une autre famille ce qui permet, peu à peu, d'élargir le nombre des bénéficiaires.

Cet essai de valorisation en grandeur nature, qui a connu un vif succès, montre qu'il est possible sur la base d'une concertation entre les différents acteurs — paysans, techniciens et ingénieurs agronomes représentant l'État et chercheurs — d'atteindre les objectifs fixés. Les paysans ont démontré qu'ils pouvaient s'intégrer positivement à une opération de conservation des sols et qu'ils étaient prêts à se former à des pratiques culturelles mieux adaptées aux pentes de la Sierra, dans la mesure où ces pratiques tiennent compte de leurs traditions et de leurs savoir-faire. Cet exemple concret prouve qu'il existe d'autres stratégies que de placer le paysan en position passive d'assisté par l'introduction de pratiques étrangères à sa région et à sa culture, ainsi qu'il est fait dans de nombreux programmes de conservation des sols pour lesquels le taux d'échec est supérieur à celui de réussite.

Une campagne de pluies simulées a été réalisée pour préciser certains aspects qui n'ont pu être définis sur les parcelles améliorées : d'une part, le comportement du sol enherbé, testé sur la majorité des stations, et, d'autre part, celui de la cangahua, qui occupe de larges surfaces dans la Sierra volcanique du Nord.

Le sol enherbé tient une place importante dans la stratégie de lutte anti-érosive mise en place expérimentalement sur les stations. Les ouvrages de type bandes ou murets « végétalisés » ont donné de bons résultats par rapport aux autres méthodes testées pour réduire l'énergie du ruissellement et retenir les particules de sol. Néanmoins, les bandes enherbées, pour répondre pleinement au but recherché, doivent également avoir un impact au niveau de la fonction de production du ruissellement. Deux questions découlent de cette remarque : quel est le comportement du sol enherbé dans le partage infiltration/ruissellement ? Le type de graminée peut-il avoir un impact sur la capacité du sol à infiltrer une certaine quantité d'eau ? Les observations et les mesures pouvant aider à répondre à ces questions sont très difficilement perceptibles à l'échelle de la parcelle où les résultats expriment l'effet de plusieurs variables. Le recours à la pluie simulée, qui permet d'isoler le comportement du sol avec ou sans couvert végétal, s'est donc révélé très utile une nouvelle fois, à la suite de la première série de pluies simulées réalisées dans l'environnement des parcelles témoins.

Dans le même ordre d'idées, les questions posées par la cangahua ont justifié l'emploi du simulateur de pluies. Lorsque l'érosion fait affleurer

Les simulations de pluies en situations améliorées

Dispositif et protocole

la cangahua, la déprise agricole tend à s'accélérer sur cette formation indurée et impropre en l'état à l'agriculture (cf. chap. v). Pour freiner l'exode des paysans, il faut se poser la question de la réhabilitation possible de la cangahua pour l'agriculture. Rappelons que pour pouvoir réhabiliter cette formation, il faut d'abord défoncer sa surface puis pulvériser les mottes pour préparer le lit de semence. Le problème majeur réside dans ce travail de réhabilitation, qui rend le matériau de plus en plus érodible à mesure que s'amenuise la taille des agrégats, comme le montrent les résultats obtenus sur les parcelles témoins de la station de Cangahua (cf. chap. vi).

Bien que de bons résultats aient été obtenus sur les parcelles améliorées de cette même station pour réduire les pertes en terre, d'autres problèmes devaient être résolus pour mieux répondre à l'attente du paysannat. Les risques d'érosion demeuraient sensibles, car le matériau pulvérulent est très battant, en outre il infiltre faiblement l'eau, d'où l'existence d'un déficit hydrique pour l'alimentation de la plante. Enfin, il est peu fertile en l'état, notamment à cause d'une carence en matière organique, ce qui nuit à l'obtention de rendements corrects.

Ces différents facteurs limitants ont été mis en évidence sur les parcelles de ruissellement mais l'approche n'a pas été assez précise pour permettre d'y remédier. C'est la raison pour laquelle une nouvelle série de pluies simulées a été effectuée, avec pour objectif d'évaluer l'influence d'amendements organiques et d'apports de pierres poncees sur le comportement hydrodynamique de la cangahua réhabilitée.

Pour des raisons pratiques d'accessibilité à une source d'alimentation en eau destinée au simulateur, les essais ont été effectués sur le site de Tumbaco, à proximité de la station, sur une zone dégradée où affleure une surface de cangahua indurée, de l'ordre d'un demi-hectare. Les situations suivantes ont été testées sur des microparcelles de 1 m² :

- la cangahua défoncée à différentes profondeurs : 4 parcelles défoncées à 0,20 m ; 3 parcelles défoncées à 0,40 m ; 3 parcelles défoncées à 0,60 m. Les mottes sont ensuite brisées et ratisées dans le sens de la pente, sans aucun apport ;
- la cangahua défoncée à 0,20 m de profondeur et brisée en mottes, avec incorporation de matière organique dans tout le profil, puis ratisée dans le sens de la pente. On a réalisé ainsi : 3 parcelles avec 40 t ha⁻¹ de fumier de poulet ; 1 parcelle avec 80 t ha⁻¹ de fumier de poulet ; 3 parcelles avec 120 t ha⁻¹ de fumier de poulet ; 3 parcelles avec 120 t ha⁻¹ de fumier de bovin ;

– la cangahua défoncée à 0,20 m de profondeur et brisée en mottes, avec incorporation de pierres ponce dans tout le profil, soit une augmentation de 16 % du volume initial de sol, puis ratissée dans le sens de la pente. Trois parcelles ont été ainsi préparées.

Pour toutes les simulations de pluies, tant sur sol enherbé que sur cangahua réhabilitée, les protocoles expérimentaux que nous avons suivis sont les mêmes que ceux déjà utilisés sur les situations témoins (cf. chap. vii). Rappelons que les intensités maximales simulées ont une durée de 10, 15 et 30 minutes et que trois états hydriques, étalés sur 24 heures, sont pris en compte.

Le pourcentage de couverture végétale sur la microparcelle de 1 m² est proche de 100 % sur toutes les stations.

Les valeurs de la pluie d'imbibition (Pi), comprises entre 2 et 15 mm, sont faibles dans l'ensemble et comparables à celles obtenues en situation témoin sur sol nu, qui est la plus défavorable (cf. chap. vii). On a tracé sur la figure 36 les histogrammes se rapportant aux valeurs de Rmax. Corrélativement aux valeurs de Pi, les valeurs de Rmax sont élevées comme cela avait été noté également sur sol nu. Trois sites se distinguent particulièrement – Riobamba, Mojanda et Jadan – avec des valeurs maximales comprises entre 50 et 60 mm h⁻¹. En revanche, l'eau qui ruisselle est quasi propre, car les charges solides exportées sous prairie, comprises entre 5 et 30 kg ha⁻¹, sont très faibles.

Pour illustrer globalement cette dynamique, les courbes de ruissellement (hydrogramme) et les courbes des charges exportées (turbidigramme) des trois stations ont été tracées (fig. 37). Nous avons choisi une situation intermédiaire avec un sol humide et la pluie simulée d'intensité IM 15 = 60 mm h⁻¹. L'examen des graphes montre que le ruissellement est actif sur ce type de couvert. Le début de l'essai est marqué par une phase d'imbibition de courte durée qui n'excède pas 5-7 mn, puis lui succède une phase transitoire qui indique une augmentation rapide de l'intensité de ruissellement. Ensuite intervient, à partir de 8 à 10 mn, la dernière phase qui exprime la stabilisation du ruissellement à des valeurs maximales. Les exemples choisis sont caractérisés par des intensités de ruissellement de l'ordre de 40-50 mm h⁻¹ à Riobamba et à Mojanda. Ces dernières sont plus faibles à Jadan, où elles avoisinent 30 mm h⁻¹. Sur le site de Jadan, la couverture végétale n'est pas totale et laisse entrevoir de petites plages de sol nu où l'infiltration est plus forte. L'érosion est inexistante dans les trois cas.

Les résultats des pluies simulées en situation améliorée

Le sol enherbé

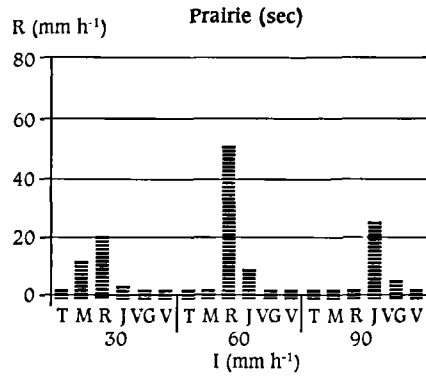
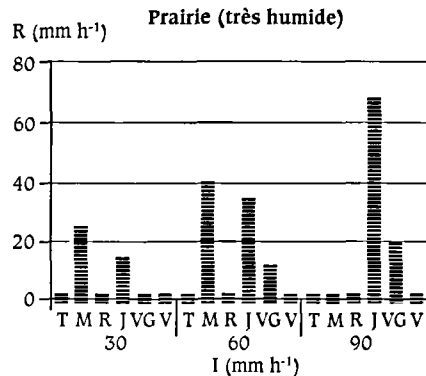
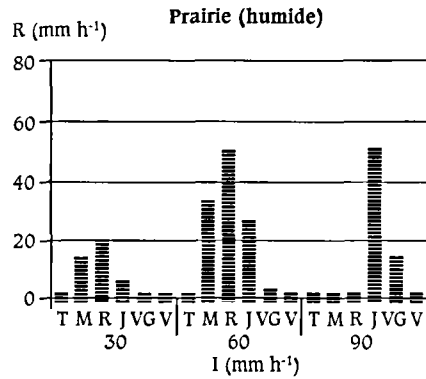


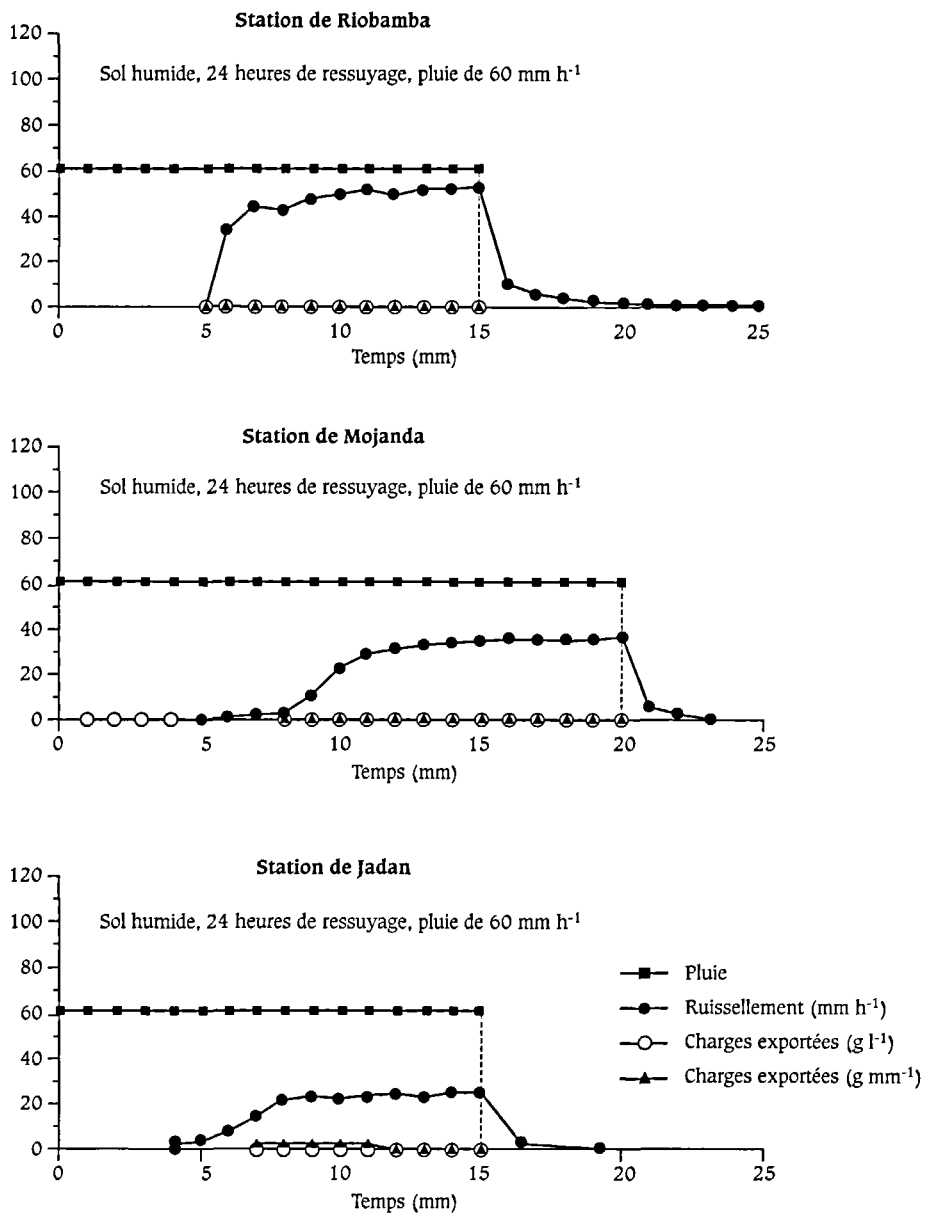
FIG. 36 — Simulation de pluies sur prairie. Variation du ruissellement maximal (R, mm h⁻¹) en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm h⁻¹)



T : Tumbaco
M : Mojanda
R : Riobamba
J : Jadan
VG : Vega Grande
V : Ventanas

Le sol n'intervient que faiblement dans l'interprétation de ces comportements. En contrepartie, les caractéristiques morphologiques des graminées sont essentielles pour expliquer les forts ruissellements observés. Sur les trois stations, tous les essais ont été effectués sur des graminées du type *pasto azul* (*Dactylus glomerata*) et *pasto Kikuyu* (*Penisetum clandestinum*), qui ont un excellent développement latéral, très couvrant, avec une

FIG. 37 — Transfert d'eau et de matière solide sur prairie sous pluie constante (Riobamba, Mojanda, Jadan)



prospection racinaire en profondeur plutôt faible. Néanmoins pour apprécier l'effet d'un autre type de pâturage, on a réalisé une nouvelle série de pluies simulées à Tumbaco en utilisant une graminée différente des précédentes et encore peu en usage dans la région, le *pasto lloron* (*Eragrostis curvula*). Celui-ci forme de grosses touffes qui se caractérisent par un port élevé et vertical des tiges et par une prospection racinaire

abondante et profonde. Il est intéressant de noter que pour tous les tests, même avec des intensités maximales de l'ordre de 100 mm h^{-1} , le ruissellement est resté quasi inexistant sur ce type de graminée, alors que les essais effectués sur *kikuyu* et *pasto azul* ont donné des valeurs de ruissellement relativement élevées. Ce dernier test montre que l'on peut observer des différences de comportement importantes selon le type de graminée utilisé.

La cangahua réhabilitée

² Nous avons veillé à appliquer la même pluie utile, quelles que soient les intensités simulées : IM 30 à 30 mm h^{-1} , IM 15 à 60 mm h^{-1} , et IM 10 à 90 mm h^{-1} , correspondent toutes à une pluie utile de 15 mm .

³ À des fins de comparaison, nous avons placé sur le graphe la situation de cangahua indurée, qui illustre un cas extrême : en effet, de par son induration et sa surface nue et lisse, cette formation ruisselle quasi instantanément sans perdre de terre.

Les résultats des différents essais effectués sur cangahua réhabilitée ont été reportés sur la figure 38 où sont mises en relation la pluie utile et la lame d'eau ruisselée. La pluie utile correspond à la hauteur d'eau effectivement tombée durant le test², et la pluie efficace représente la pluie qui provoque le ruissellement ; elle est calculée par différence entre la pluie utile et la pluie d'imbibition.

À partir de ce graphe³, on peut déduire :

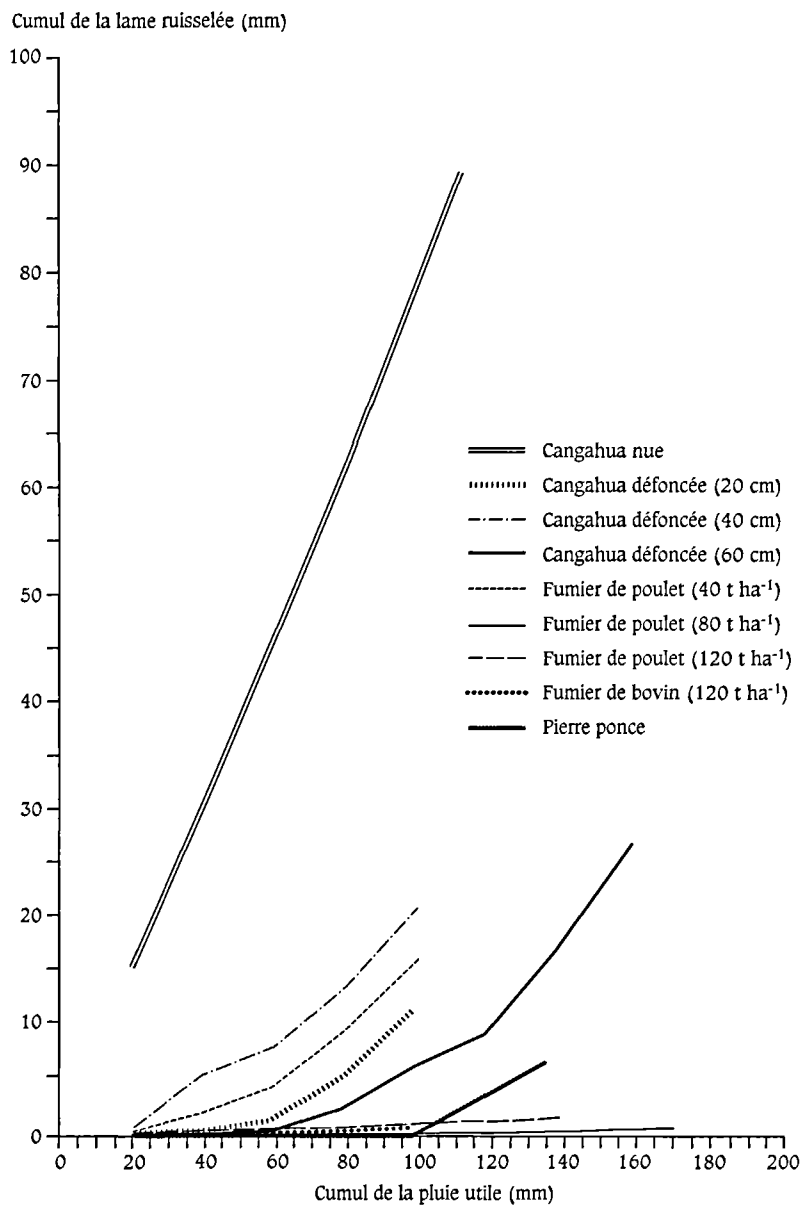
– pour la cangahua défoncée sur $0,20\text{-}0,40$ et $0,60 \text{ m}$ de profondeur, sans aucun apport et pour des intensités de $30, 60$ et 90 mm h^{-1} , à IM 30 = 30 mm h^{-1} , le ruissellement est absent ou très faible pour les trois profondeurs, et ne s'exprime qu'à partir des essais menés à IM 15 = 60 mm h^{-1} et à IM 10 = 90 mm h^{-1} .

On n'a placé sur le graphe que les deux profondeurs extrêmes de labour correspondant à $0,2$ et $0,6 \text{ m}$. On constate que la relation « pluie utile – lame ruisselée » ne met pas en évidence de différence significative en fonction de la profondeur de défonçage de la cangahua. Les faibles variations constatées restent du même ordre de grandeur et ne traduisent pas d'évolution significative. Indépendamment des profondeurs de défonçage, le comportement de la cangahua au ruissellement se modifie en fonction des états hydriques. Sur sol sec, le ruissellement est nul, quelle que soit l'intensité de pluie ; sur sol humide, les ruissellements maximaux sont faibles, de 0% à 14% , et sur sol très humide ($>$ à 25% de la masse volumique), les ruissellements maximaux varient de 30% à 58% .

Considérant qu'il n'y a pas d'effet profondeur du travail du sol dans les conditions de l'expérimentation, les autres tests portant sur l'incorporation de matières organiques et de pierres poncees ont été réalisés avec pour limite une profondeur de défonçage de $0,20 \text{ m}$.

Pour les matières organiques, les quelques essais de réhabilitation que nous avons pu observer dans les zones où la cangahua occupe de

FIG. 38 — Relations pluie utile — lame ruisselée



grandes surfaces montrent que le paysan incorpore essentiellement du fumier de poulet, car il existe autour des quelques grandes villes de la Sierra de nombreux élevages de poulets. En second ordre, le paysan utilise aussi du fumier de bovin ; néanmoins, ce dernier est plus difficile à se procurer car il est surtout produit par les troupeaux des haciendas qui le recyclent en grande partie sur place.

Les doses utilisées par les paysans – souvent inférieures à 20 t ha⁻¹ – nous paraissant trop faibles, nous avons testé des doses plus fortes afin de pouvoir mettre en évidence l'effet fumier sur la cangahua défoncée à 0,20 m. Les doses utilisées sont :

- pour le fumier de poulet : 40 t ha⁻¹, 80 t ha⁻¹, 120 t ha⁻¹ ;
- pour le fumier de bovin, 120 t ha⁻¹.

Par type d'intensité, on a obtenu les résultats suivants qui donnent une bonne appréciation de l'effet de l'incorporation de matière organique sur l'infiltration de l'eau dans le sol (LEPRUN *et al.*, 1986 ; ALBRECHT *et al.*, 1992). À 30 mm h⁻¹, on observe que le ruissellement est absent lors des premières pluies, puis très faible quel que soit le type de fumier. À 60 mm h⁻¹, les manifestations du ruissellement restent faibles alors que sur la cangahua défoncée, sans apport, les lames ruisselées sont comprises entre 10 et 22 mm pour une pluie utile de 100 mm réalisée en 5 averses. À 90 mm h⁻¹, enfin, le ruissellement s'organise et devient aussi efficace que dans le cas de la cangahua sans apport, l'effet de la dose de fumier de 40 t ha⁻¹ étant nul. Néanmoins, pour les doses supérieures, 80 et 120 t ha⁻¹, le ruissellement continue à être faible, quel que soit le fumier utilisé.

Nous avons également testé l'apport de pierres ponce : la pierre ponce, très abondante dans les couches géologiques, n'est pas utilisée en général par le paysan. Son emploi est récent et revient aux horticulteurs et aux fleuristes, dont l'activité, à la périphérie des grandes villes, est en pleine expansion. Ils utilisent ce matériau pour le stockage de l'eau dans le sol.

Dans nos tests, nous avons utilisé, en nous inspirant de cette pratique, une couche de quatre centimètres d'épaisseur composée exclusivement de pierres ponce. Celles-ci ont été répandues sur la cangahua préalablement défoncée, puis incorporées et bien mélangées sur les premiers 0,20 m de profondeur. Avec ce traitement, nous avons constaté une capacité d'infiltration supérieure à 90 mm h⁻¹. Tout s'infiltré jusqu'à totaliser une pluie utile d'environ 100 mm, le système fonctionne alors comme un réservoir qui déborderait une fois plein. Pour arriver à une telle situation de débordement, une pluie de hauteur et d'intensité centennale serait nécessaire (POURRUT, 1994) !

De cette série de pluies simulées, dont l'objectif était d'apprécier la dynamique de l'eau dans le sol dans le cas de quelques situations améliorées, on peut tirer les enseignements suivants :

- la cangahua défoncée et pulvérisée pour la réhabilitation est un matériau très sensible à la battance des pluies, qui se ferme rapidement en surface et qui présente de forts risques de ruissellement ;

- l'incorporation de matière organique améliore de façon substantielle l'infiltration et le stockage de l'eau. Trois mois après cette campagne, et malgré la sécheresse, on pouvait remarquer la présence d'une importante végétation, uniquement sur les trois parcelles traitées au fumier. L'absence constatée d'effet avec un apport de 40 t ha⁻¹ montre que la dose utilisée par les paysans, de l'ordre de 20 t ha⁻¹, est comme on pouvait s'y attendre insuffisante. On a donc bien fait de passer directement à des doses supérieures et il semble, sur la base des résultats acquis, que le seuil d'efficacité se situe entre 40 et 80 t ha⁻¹, la dose optimale restant à déterminer. Les doses d'amendements organiques employées actuellement par les agriculteurs se situent bien en deçà de cette limite et sont donc inefficaces pour améliorer l'infiltration de l'eau ;
- la pierre ponce joue un rôle efficace de filtre en augmentant la macroporosité du sol, sa capacité de stockage de l'eau n'a pas été testée. Néanmoins, on doit être conscient qu'augmenter l'infiltration sur ce type de sol, qui repose sur un horizon induré à faible profondeur et sur des pentes généralement déclives, peut accroître les risques de ruissellement hypodermique et de glissement. Il apparaît donc qu'une méthode mixte qui combinerait matière organique et pierres ponce, à des doses dans ce cas plus faibles que celles testées ici, devrait améliorer significativement l'infiltration.

En conclusion, il ressort que les améliorations testées permettent de répondre positivement à l'objectif de notre recherche appliquée. Par rapport aux situations témoins, les pertes en terre et les pertes en eau par ruissellement relevées sous pluies naturelles et simulées sont nettement plus faibles en situations améliorées et atteignent des valeurs-seuils admissibles pour un milieu particulier comme celui du minifundio de la Sierra équatorienne. Par ailleurs, ces résultats sont issus de méthodes et d'ouvrages qui tiennent compte des besoins et des capacités socio-économiques des populations, et les conditions de faisabilité sont bonnes. Néanmoins, pour pouvoir valoriser correctement cette stratégie et lui assurer une efficacité durable, une attention particulière devra être portée, lorsque l'on passe des conditions expérimentales aux vraies conditions de culture par les paysans, aux phénomènes de report hydrique et d'érosion mécanique sèche.

Les phénomènes de reports hydriques (« run on ») se réfèrent à la production de ruissellement sur un secteur du versant et aux perturbations

La possible lutte antiérosive

que l'écoulement de cette eau peut occasionner sur un autre secteur du versant situé en aval. Ce processus s'intègre donc dans la dynamique et la gestion de l'eau à l'échelle du terroir ou du versant. À l'échelle de la parcelle de ruissellement améliorée, les effets des reports hydriques, dus à des surfaces très ruisselantes, ne sont que partiellement perceptibles du fait que la surface expérimentale ne représente qu'une partie du champ cultivé ou du versant. Néanmoins, les simulations de pluies ont bien démontré l'influence de surfaces potentiellement ruisselantes, comme la cangahua et le sol lorsqu'il est couvert par certains types de couverts végétaux. En vraies conditions de terrain, sur un versant où s'étagent plusieurs parcelles, les risques d'érosion peuvent augmenter considérablement s'il existe des surfaces ruisselantes non contrôlées. Dans ce cas, à l'échelle du terroir ou du versant, se pose donc un vrai problème de gestion de l'eau : il faut alors compléter et doubler les ouvrages par un réseau de rigoles ou de fossés pour dévier et capter l'eau afin de protéger les champs cultivés des écoulements en provenance de l'amont. Initialement, le paysage du minifundio est fermé et forme une sorte de bocage qui atténue les effets des reports hydriques ; néanmoins, la tendance actuelle à la mécanisation collective et à la disparition des haies ou murets de toutes sortes est un facteur aggravant.

Les manifestations de « l'érosion mécanique sèche » sont également à prendre en compte. Ce type particulier d'érosion du sol est provoqué par l'homme sans qu'interviennent la pluie ou le vent. Il se produit lorsque le paysan travaille le sol et qu'il entraîne progressivement avec ses outils, voire dans certains cas avec le tracteur, la terre du haut vers le bas du versant, processus d'autant plus actif que l'inclinaison de la pente est forte. Nous avons remarqué sur les parcelles améliorées que des volumes de terre importants avaient été transportés par les outils lors des opérations de semis ou au cours de la récolte. La terre s'accumule derrière les ouvrages de lutte antiérosive pouvant laisser croire, à tort, que ce remblaiement est dû à l'érosion par l'eau. Jusqu'à 15-20 % de pente, ce phénomène est relativement contrôlable et n'impose qu'un réajustement léger de la configuration des ouvrages isohypses, qu'il s'agisse des bandes enherbées ou des murets. Au-delà de cette limite de pente, il est nécessaire de procéder, chaque année, à une élévation de la hauteur de l'ouvrage pour compenser l'épaisseur de terre qui s'est accumulée derrière celui-ci. Le cas le plus significatif est celui de Mojanda, car la station se situe sur une pente moyenne de 40 %. Au départ, chaque ouvrage était constitué par deux rangées superposées de mottes de terre dont la hauteur était d'environ 30 cm (cf. fig. 31). Puis, progressivement, à l'occasion des travaux culturaux liés au semis et aux récoltes et effectués à la houe, des

déplacements considérables de terre se sont produits du haut vers le bas de la parcelle. Le piochage du sol, qui commence toujours au pied de l'ouvrage, donne lieu à un surcreusement à la base de celui-ci, puis à un déplacement de la terre vers le bas de la parcelle jusqu'à ce qu'un autre ouvrage fasse obstacle. Ces déplacements simultanés de terre, par creusement à l'avant de l'ouvrage et par remblaiement à l'arrière, nous ont obligés à surélever la hauteur de tous les ouvrages d'environ 0,35 m par an. Sur 20 mois d'observation, la hauteur est passée de 0,30 m à 1,30 m et à 1,60-1,80 m au bout de quatre ans. À partir de la cinquième année, il n'a plus été nécessaire de modifier la hauteur. Le versant avait évolué vers un profil en terrasses bien individualisées où la pente entre deux talus s'était stabilisée autour d'une valeur de l'ordre de 10 %-15 %.

Il est remarquable de constater que cette évolution, que nous n'avions pas prévue, est à attribuer aux seuls travaux culturaux. On estime que le poids de terre qui s'accumulait annuellement derrière chaque ouvrage était d'environ 8 t par 20 m linéaire, soit 40 t ha⁻¹ dans le cas d'un seul ouvrage par 100 m de long.

Néanmoins, il n'aurait pas été envisageable au départ, pour des problèmes évidents de stabilité, de construire des talus pouvant dépasser 1,5 m de haut. La bonne cohésion du matériel motteux utilisé a permis d'atteindre cette hauteur sans problème majeur, ce qui n'aurait certainement pas été le cas dans d'autres conditions pédologiques (ROOSE et NDAYIZIGIYE, 1994). Cela étant, les effets de l'érosion mécanique sèche étant dorénavant reconnus, il devrait être possible de mieux contrôler ce type d'érosion, ce qui permettrait de diminuer l'accumulation de terre derrière les ouvrages afin que ces derniers n'excèdent pas un mètre de hauteur.

Conclusion

L'objectif premier de notre recherche a été de répondre à une demande précise de coopération émanant du gouvernement équatorien pour définir une stratégie de lutte antiérosive dans la Sierra, la région andine du pays, où l'érosion des sols cultivés est la plus active. Pour apporter des solutions, une phase de recherches menées à différentes échelles, à la fois qualitative et quantitative, s'est avérée nécessaire afin de compléter les connaissances sur l'environnement physique et humain de cette région d'Équateur aux prises avec des problèmes aigus d'érosion.

Au long des quarante ans qui précèdent, les effets de la réforme agraire en date des années soixante ont poussé les petits paysans, contraints jusque-là de travailler dans les grands domaines des haciendas, à s'installer sur les versants et les hautes terres de la Sierra, provoquant une extension sans précédent du minifundio. Les bonnes terres agricoles situées dans les bassins et les vallées ont subi dans l'ensemble peu de modifications et sont restées la propriété des haciendas qui y pratiquent un élevage extensif. La pression du minifundio sur la terre s'est progressivement renforcée durant cette période, avec par endroits des densités de population supérieures à 100 habitants par kilomètre carré, remettant ainsi en cause la durabilité de ce type d'agrosystème. Parmi les contraintes qui pèsent sur le développement du minifundio, l'érosion des sols, qui s'est accélérée à mesure qu'augmentait cette pression, constitue aujourd'hui un problème majeur. La problématique globale est d'autant plus complexe que la question de la durabilité du minifundio est associée au problème posé par un environnement physique de haute montagne tropicale, dans lequel les risques d'érosion sont naturellement importants.

Au travers de cette problématique, plusieurs aspects originaux sur le plan de la recherche ont été abordés, tant au niveau des connaissances que des méthodes de travail. Si la connaissance des pays du Sud s'est développée dans les milieux de forêt, de savane ou dans les zones arides, l'exemple de la Sierra montre qu'il existe également un contexte montagnard de régions chaudes encore mal connu, et caractérisé par la présence de populations assez denses étagées entre 1 500 et 4 000 mètres d'altitude. C'est le cas dans la cordillère des Andes, mais aussi dans les zones montagneuses d'Afrique de l'Est, d'Asie ou de

Méditerranée. La montagne étant un milieu plus difficile à mettre en valeur que les plaines et les vallées, les hommes qui y vivent connaissent des problèmes spécifiques (pente, altitude, climat), pris en compte par notre recherche, qui nécessitent l'acquisition d'un certain nombre de connaissances. Le bilan peut être exprimé sous la forme de trois grands types d'acquis, d'ordre méthodologique, scientifique et technique.

Des acquis d'ordre méthodologique

L'érosion des sols dans la Sierra a d'abord été appréhendée par une caractérisation qualitative et spatiale de ses manifestations. Cette phase initiale était nécessaire pour situer objectivement la problématique dans son contexte géographique, mais insuffisante pour analyser chacun des principaux facteurs de l'érosion ainsi que leurs interrelations, éléments de connaissance primordiaux pour poser les bases d'une stratégie de lutte antiérosive. Le passage à l'étude quantitative s'est donc imposé et s'est traduit par le recours à la mesure du ruissellement et de l'érosion sur sept stations expérimentales implantées au sein de grands bassins représentatifs des milieux cultivés de la Sierra. Sur chaque site de station, des parcelles de ruissellement ont été installées et suivies pendant cinq ans et plusieurs centaines de pluies simulées ont été effectuées. Au total donc, pionnier en Équateur et très novateur à l'échelle des Andes, un réseau composé de sept stations formées de 26 parcelles expérimentales de mesures de l'érosion a été créé.

En choisissant la méthode des parcelles expérimentales et de la simulation de pluies, nous nous inscrivons dans les grands courants de la recherche internationale qui s'intéressent aux mesures du ruissellement et de l'érosion. Néanmoins, pour pouvoir répondre à la demande du partenaire, nous avons été conduits à développer plusieurs aspects spécifiques, concernant :

- la situation des stations expérimentales : en général, ce type d'étude est réalisé dans des stations agronomiques, dotées d'appareils de mesures performants et faciles d'accès, où la précision des observations est recherchée avant tout dans le but d'élaborer des modèles. Ces stations sont rarement situées là où les conditions de sol et de culture sont les plus représentatives et elles sont peu favorables au développement de relations suivies avec les paysans. Quitte à être moins précis sur la qualité des mesures, nous avons préféré installer notre dispositif chez les paysans, en conditions réelles de terrain ;
- la taille des parcelles : en général, la taille la plus courante est comprise entre 50 et 100 m², soit une longueur de 10 à 20 m pour une largeur

de 5 m. Dans le cas d'un sol nu, non travaillé, qui est la situation de référence du modèle américain de Wischmeier (WISCHMEIER et SMITH, 1978, 1981) cette taille semble convenir. En revanche, elle se révèle insuffisante lorsque le sol est travaillé et planté. Nous avons résolu ce problème et nous nous sommes rapprochés de l'échelle de la parcelle paysanne en installant des parcelles beaucoup plus grandes, atteignant 1 000 m², qui ne sont que rarement utilisées ;



Communiquer et former sont deux des fondements essentiels de la démarche participative. Dans les régions qui présentent des caractéristiques proches de celles des stations, il n'est plus nécessaire d'installer des parcelles expérimentales mais de faire connaître les résultats acquis, d'expliquer et de former les paysans aux techniques de lutte. Lors d'une séance de travail, la méthode de simulation de pluies et les résultats obtenus sur des sols associés à la cangahua sont présentés à des techniciens du Ministère équatorien de l'Agriculture.

– l'objectif d'application dans lequel a été conçue notre recherche : nous n'avons pas cherché à reproduire le modèle américain de Wischmeier, les mesures effectuées n'ayant pas pour but de quantifier globalement l'érosion. Si nous avons choisi ces méthodes, c'est parce qu'elles permettent d'évaluer et de comparer l'action de l'érosion en fonction de différents modes de cultures, traditionnels et améliorés et de tester l'efficacité de nos recommandations pour lutter contre l'érosion. En aucun cas, les mesures obtenues ne sont transposables à l'échelle du grand bassin versant ou du sous-bassin versant. Elles ne sont transposables que sur des sites – versant ou terroir, éventuellement petit bassin versant élémentaire – qui présentent les mêmes conditions de milieu que nos stations de mesures.

Ainsi, les paysans se sont sentis intégrés à la démarche et ont participé positivement, nous permettant d'inclure dans notre dispositif une nécessaire dimension socio-économique de la connaissance du sol, peu prise en compte généralement. Des erreurs ont ainsi pu être évitées, notre démarche étant circonscrite à un contexte de réalités de terrain vécues. À une époque où la recherche porte ses efforts sur l'élaboration de modèles, la pertinence d'une telle approche dans le cadre d'une recherche appliquée comme celle que nous avons menée en Équateur pose une interrogation : le comportement, complexe et particulier, de la société du minifundio est-il modélisable ? Partant de là, la modélisation est-elle nécessaire à la réussite d'un programme appliqué de conservation des sols ?

Des acquis d'ordre scientifique

Les recherches sur l'érosion, qui se sont considérablement développées et spécialisées au cours des cinquante dernières années, se sont essentiellement focalisées sur les régions de plaines et de collines, et sur les sols ferrallitiques, ferrugineux et fersiallitiques qu'on y trouve généralement. Notre recherche apporte donc un éclairage nouveau sur les manifestations de l'érosion en montagne, mal connues, ainsi que sur les sols volcaniques qui présentent de fortes aptitudes pour l'agriculture.

Nos mesures indiquent que l'érosion est forte, même s'il existe des différences de comportement entre les situations culturales pour un même type de sol et entre les sols des stations. La remarquable stabilité du premier labour n'est qu'éphémère et celui-ci évoluera inévitablement en un ancien labour plus érodible si des mesures conservatoires ne sont pas prises.

Concernant les sols des stations, les sols andiques, lorsqu'ils sont mis en culture, se montrent plus sensibles à l'érosion que les autres types de sol, en particulier les sols vertiques. L'inclinaison de la pente et la texture du sol, le taux d'argile et notamment de montmorillonite, constituent les critères essentiels d'évaluation de la stabilité des sols cultivés.

La notion d'andosol est apparue tardivement dans le vocabulaire des pédologues. Depuis une quinzaine d'années, de nombreux travaux, essentiellement français, australiens et japonais, ont permis de préciser la définition des andosols. Néanmoins, les études se réfèrent en majorité à des analyses précises de laboratoire portant sur les caractéristiques et le comportement des allophanes. Il existe très peu de références, encore actuellement, sur le comportement des andosols en conditions réelles de terrain. Ces derniers sont généralement considérés comme des sols stables et fertiles. Notre recherche montre que les andosols andins, lorsqu'ils sont cultivés, perdent leur stabilité initiale et sont plus sensibles à l'érosion que les vertisols développés sur des matériaux non volcaniques. Elle fait également apparaître l'importance par rapport à l'érosion d'une formation volcanique originale, la *cangahua*¹. Cette formation, qui forme une surface naturelle imperméable et très ruisselante, est en effet un indicateur d'érosion accélérée.

Des acquis d'ordre appliqué et technique

La série d'observations et de mesures effectuée sur les parcelles améliorées montre par comparaison avec les parcelles témoins que la progression de l'érosion n'est pas une fatalité. L'homme étant impliqué directement dans la dynamique des processus, son influence peut être corrigée de façon à ramener les effets de l'érosion à des normes admissibles. La recherche de solutions ne constitue pas une utopie, car le minifundio est forcé, pour l'instant, d'affronter cette situation. Le retour vers des terres plus fertiles situées dans le bassin est dépendant d'une nécessaire évolution sociale à l'échelon national dont il est difficile, a priori, d'évaluer la faisabilité à court et moyen termes. Les résultats issus des parcelles améliorées sont encourageants dans la perspective de pallier les difficultés de la situation actuelle. Ils indiquent qu'un ensemble de mesures, peu contraignantes et adaptées à « l'environnement physique et humain », peut faire chuter l'érosion à moins de 1 t ha⁻¹ an⁻¹ si l'on prend en compte quelques principes de base. La dissipation de l'énergie du ruissellement, associée à un travail du sol régulier visant à améliorer l'infiltration, est fondamentale. Des ouvrages simples, construits avec des matériaux locaux, et disposés perpendiculairement à la pente

¹ Cette formation, peu connue, semble cependant assez répandue. Elle a été reconnue au Pérou, en Colombie, au Mexique, en Équateur et au Japon. Selon les pays, elle porte des appellations variées : *sillar* au Pérou, *cancagua* en Colombie, *talpetate* au Nicaragua, *tepetate* au Mexique, *masa, cora* ou *nigatsuchi* au Japon (QUANTIN, 1972, 1994 ; ZEBROWSKI, 1992 ; DE NONI et al., 1992).

dominante semblent convenir. Dans un milieu de haute montagne conditionné par les phénomènes de gravité, ce type d'intervention est prioritaire pour freiner l'érosion.

En complément, les résultats obtenus sous pluies simulées démontrent les effets majeurs du travail du sol sur l'infiltration de l'eau. Les différences de comportement enregistrées sous pluies simulées entre le premier et l'ancien labour ainsi que sur la cangahua transformée en un matériau meuble indiquent qu'un travail régulier et soigné du sol ainsi que l'incorporation de matière organique pour améliorer l'agrégation donnent de bons résultats pour augmenter l'infiltration.

Le contrôle de l'érosion mécanique dite « sèche » est également indispensable. Le labour animal s'effectue en général en suivant les courbes de niveau. Dans le minifundio, très déshérité, les animaux de trait sont rares. Les labours sont réalisés manuellement ou avec des tracteurs loués à des coopératives. Dans ces deux cas, les volumes de terre transportée mécaniquement vers le bas du champ ou du versant sont considérables. À Mojanda, les mouvements du sol ont entraîné l'élévation des talus des terrasses à 1,50 m de hauteur. Au bout de quatre ans, la pente d'équilibre entre terrasses était atteinte, l'effet de ces mouvements est devenu insignifiant.

Enfin, l'aménagement des zones de reprints hydriques constitue le dernier principe important. Les pluies simulées montrent que les ruissellements sont importants sur les sols enherbés et sur la cangahua indurée. Les reprints hydriques issus de ces zones menacent les sols arables situés en contrebas. L'aménagement de ces zones, qui jusqu'ici n'a pas été pris en compte, constitue une mesure de première urgence, au même titre que la mise en œuvre de mesures conservatoires dans les zones mises en culture.

La recherche d'une indispensable concertation

Bien qu'encourageants, ces résultats ne suffiront pas s'ils ne sont pas englobés dans un processus général d'amélioration de la production agricole et de la durabilité de l'agrosystème qui doit intégrer, outre la conservation des sols, la fertilisation, évoquée précédemment, l'irrigation, l'amélioration variétale des semences, etc.

Au plan technique, cette évolution est possible dans la plupart des régions du globe, dont les Andes. Comme le montre notre recherche dans la Sierra équatorienne, l'homme a les moyens de mieux protéger la fertilité des sols et l'équilibre dynamique des paysages, afin de tendre vers une durabilité de l'agrosystème andin.

VEYRET et PECH (1993) rappellent dans leur livre *L'homme et l'environnement* l'exemple de la Champagne, qualifiée de « Pouilleuse » par les physiocrates au XVIII^e siècle et qui s'est transformée par la suite en une riche terre à blé : « Une telle évolution est forcément plus aisée dans les pays riches que dans les pays pauvres, où le paysan, directement dépendant de la nature et des aptitudes agronomiques des sols, n'a pas forcément les moyens financiers et techniques de les amender ou de les améliorer. » En effet, ce dernier aspect est fondamental. Seul, le petit paysan ne pourra assumer ce défi. Il est nécessaire qu'une véritable concertation s'établisse entre la population du minifundio, les chercheurs-techniciens et les responsables politiques. Ce n'est que par la participation forte et conjointe de l'État et du petit paysannat que seront établies les bases d'une agriculture andine durable.

Références

- ACOSTA-SOLIS M., 1968 — *División fitogeográfica y formaciones geobotánicas del Ecuador*. Quito, Casa de la Cultura ecuatoriana, 307 p.
- ACOSTA-SOLIS M., 1976 — *Investigadores de la geografía y de la naturaleza de América tropical*. Quito, IPGH, Biblioteca Ecuador, 201 p.
- ALBRECHT A., RANGON L., BARRET P., 1992 — Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 27 (1) : 121-133.
- ASSELIN J., VALENTIN C., 1978 — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, 15 (4) : 321-349.
- ASSELIN J., CUSTODE E., DE NONI G., VIENNOT M., TRUJILLO G., 1993 — *La simulación de lluvia: metodologías y prácticas*. Quito, DNA-Orstom, 66 p.
- Atlas del Ecuador*, 1982 — Paris, éditions j.a./Banco central del Ecuador, 80 p.
- ALMEIDA G., DE NONI G., NOUVELOT J. F., TRUJILLO G., WINCKELL A., 1984 — *Los principales procesos erosivos en Ecuador*. Quito, Pronareg/Pronacos/Orstom, 31 p., avec une carte du pays (2 coul.) à l'échelle de 1 : 1 000 000.
- ATHENS J. S., 1980 — *El proceso evolutivo de las sociedades complejas y la ocupación del Periodo Tardío-Cara en los Andes septentrionales del Ecuador*. Quito, Inst. de Archeología de Otavalo, 307 p.
- AVENARD J. M., 1972 — Approche cartographique des formations superficielles dans la zone du contact forêt-savane en Côte-d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Sci. Hum.*, 9 (2) : 137-140.
- AYALA E. (éd.), 1983-1990 — *Nueva Historia del Ecuador*. Quito, Corporación Editora Nacional/Editorial Grijalbo Ecuatoriana, 15 volumes.
- AYALA E., 1985 — *La Historia del Ecuador. Ensayos de interpretación*. Quito, Corporación Editora Nacional, Biblioteca de historia ecuatoriana, vol. 10, 403 p.
- BAILLY C., BENOIT de COGNAC G., VERGNETTE (J. de), ROCHE (P.), 1967 — « Note résumant les expérimentations réalisées à Madagascar sur le ruissellement et les pertes en terre en parcelles élémentaires ». In : *CR colloque sur la fertilité des sols tropicaux*, Tananarive : 1342.
- BAILLY C., MALVOS C., SARRAILH J. M., RAKOTOMANANA (J. L.), RAMPANA (L.), RAMANAHADRAY Fils, 1976 — Étude de la sensibilité des sols de Madagascar à l'érosion. Expérimentation en parcelles élémentaires. *Bois et Forêts des Tropiques*, 169.
- BARNADÉ COBO P., 1956 — « Historia del nuevo mundo ». Madrid, Ad. Atlas, *Biblioteca de autores españoles*, t. XII - cap. 18 (1653) : 121.
- BARSKY O (éd.), 1980 — *Ecuador: cambios en el agro serrano*. Quito, Flacso/Ceplaes, 531 p.
- BARSKY O., 1984 — *La reforma agraria ecuatoriana*. Quito, Flacso, 406 p.
- BENNETT H., 1939 — *Elements of soil conservation*. New York, Mac Graw-Hill.
- BLANDIN L., 1977 — *El clima y sus características en el Ecuador*. Quito, IPGH.
- BOIFFIN J., 1984 — *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Paris, thèse INA-PG, 320 p.
- BOIFFIN J., PAPY F., PEYRE Y., 1986 — *Systèmes de productions, systèmes de cultures et risques d'érosion dans le pays de Caux*. INA-PG/Inra, 154 p. + annexes.
- BOLLINE A., 1982 — *Étude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique*. Thèse doct. en géographie, université de Liège, 356 p.
- BONIFAZ E., 1979 — *Cazadores prehistóricos del Ilaló*. Quito, Bonifaz Varela 190, 113 p.
- BRYAN R. B., 1968 — The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2 : 5-26.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989 — *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Paris, Orstom, coll. Didactiques, 229 p.
- CHIRIBOGA M., 1986 — *Del indigénismo a las organizaciones indígenas*. Quito, Colección Ethnos, 179 p.
- CIEZA DE LEÓN P., 1967 — « El senorio de los Incas ». In : *La Crónica del Perú*, Lima, Instituto de Estudios peruanos : 135-139 ; 148-154.

- COLLIN DELAVALD A., 1979 — *Plaines et collines de la région occidentale de l'Équateur*. Thèse, univ. Paris-VII, 705 p.
- COLLINET J., VALENTIN C., 1979 — Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Applications agronomiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 17 (4) : 283-328.
- COLLINET J., 1988 — *Comportement hydrodynamique et érosif de sols de l'Afrique de l'Ouest. Évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies*. Thèse de doctorat, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 513 p.
- COLMET-DAAGE F. *et al.*, 1967 et 1969 — Caractéristiques de quelques sols d'Équateur dérivés de cendres volcaniques : 1^{re} partie : *Cah Orstom, sér. Pédol.*, 5 (1) : 3-37 ; 2^e partie : *Cah Orstom, sér. Pédol.*, 5 (4) : 353-391 ; 3^e partie : *Cah Orstom, sér. Pédol.*, 7 (4) : 493-560.
- COLMET-DAAGE F. *et al.*, 1979 et 1980 — *Mapas de suelos de la Sierra ecuatoriana, 1 : 50 000 ; ozalid, 20 hojas norte, 20 hojas centro-norte, 20 hojas centro, 20 hojas centro-sur, 13 hojas extremo sur*. Quito, MAG/Orstom.
- COLMET-DAAGE F., ZEBROWSKI C., Departamento de Edafología de Pronareg, 1983-1985 — *Mapas de suelos de la Sierra ecuatoriana en colores, 1 : 200 000 : Tulcan, Ibarra, Quito, Latacunga-Ambato, Riobamba, Canar, Cuenca, Loja, Zamora, Macara*. Quito, MAG/Orstom.
- COSTALES P., COSTALES A., 1971 — « Reforma agraria ». In : *Historia social del Ecuador*, Quito, Casa de la Cultura ecuatoriana.
- CTFT, 1966 — *L'équation universelle de perte de sol de Wischmeier*. Madagascar, rapport multigr., 15 p.
- CTFT, 1970 — *Cinquième campagne d'observations sur la station de mesure de l'érosion d'Allokoto*. Rapport multigr., Niger-Haute-Volta, 34 p.
- CTFT, 1979 — *Conservation des sols au sud du Sahara*. Paris, CTFT/Ministère de la Coopération, coll. Techniques rurales en Afrique, 296 p.
- CUSTODE E., SOURDAT M., 1975-1983 — *Cartes morpho-pédologiques de l'Amazonie (Provinces de Napo, Morona-Santiago et Zamora-Chinchi)*, 1 : 500 000. Quito, département de géomorphologie-pédologie de Pronareg-Orstom.
- CUSTODE E., SOURDAT M., 1986 — « Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana entre la conservación y la explotación ». In : *Coloquio Ecuador 86, Revista Cultura*, 8 (24 a), Quito, Banco Central, MAG/Orstom : 325-337.
- CUSTODE E., VIENNOT M., 1986 a — El riesgo de erosión en la región amazónica. Quito, Cedig/Orstom, *Documentos de investigación*, 6 : 79-88.
- CUSTODE E., VIENNOT M., 1986 b — « Evaluación de algunas características físicas y químicas de los suelos recientemente cultivados en la Región Amazónica del Ecuador ».
- In : *Coloquio Ecuador 86, Revista Cultura*, 8 (24 a), Quito, Banco Central, MAG/Orstom : 371-382.
- CUSTODE E., VIENNOT M., 1992 — « Impacto del cultivo en 3 suelos de la región amazónica ecuatoriana ». In : *Ecología desenvolvimento e cooperacao na Amazonia*, Série cooperacao amazonico, Universidad Federal da Para, Belém-Para (Brésil) : 122-136.
- CUSTODE E., DE NONI G., TRUJILLO G., VIENNOT M., 1992 — « La cangahua en el Ecuador, caracterización morfo-edafológica y comportamiento frente a la erosión ». In : *Suelos volcánicos endurecidos*, México, Sociedad mexicana de la ciencia del suelo, 1 carte et 10 tabl : 332-346.
- DEMANGEOT J., 1976 — *Les espaces naturels tropicaux*. Paris, Masson, 190 p.
- DEMANGEOT J., 1990 — « La part des montagnes dans les milieux naturels continentaux ». In : *La terre et les hommes*, Clermont-Ferrand, Fac. lettres et sc. humaines : 587-596.
- DE NONI G., 1978 — *La cartographie au service d'un inventaire géomorphologique de la province du Pastaza (Amazonie équatorienne) : types de relief et apports volcaniques*. Thèse de 3^e cycle, géographie physique des régions cristallines et volcaniques, Clermont-Ferrand, 142 p.
- DE NONI G., 1982 — *Análisis cualitativo de tres procesos de erosión en la Sierra volcánica del Ecuador*. Quito, Cedig/Orstom, *Documentos de investigación* 2 : 39-54.

- DE NONI G., 1986 — Breve visión histórica de la erosión en el Ecuador. Quito, Cedig/Orstom, *Documentos de investigación*, 6 : 15-23.
- DE NONI G., GUEVARA O., 1980 — *Reconocimiento cartográfico de la región amazónica ecuatoriana : Provincia del Pastaza*. Quito, Département de géomorphologie et de télédétection de Pronareg-Orstom, 36 p. + une carte coul. à 1 : 500 000.
- DE NONI G., NOUVELOT J. F., 1983 — « Los principales procesos erosivos en Ecuador ». In : *Políticas sobre conservación de los recursos naturales renovables, en particular del recurso suelo*, Quito, MAG/Unesco : 48-59.
- 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*, 16 (1), Bogota : 23-31.
- DE NONI G., VIENNOT M., 1989 — *Le projet DNA-Orstom sur l'étude de l'érosion et des pratiques de conservation des sols en Équateur*. Bulletin du Réseau Érosion, Montpellier, Orstom, 5 p.
- DE NONI G., VIENNOT M., 1990 — « De l'approximation cartographique aux réalisations de terrain : la lutte contre l'érosion agricole dans les Andes équatoriennes ». In : *Les sociétés rurales de montagne (Andes et Himalaya)*, université de Grenoble/CNRS : 61-65.
- DE NONI G., VIENNOT M., 1993 — *Les recherches sur l'érosion par l'Orstom, évolution et perspectives : cas de la montagne équatorienne*. Journées Piren, CNRS, Lyon, 12 p.
- DE NONI G., NOUVELOT J. F., TRUJILLO G., 1985 — « Erosion and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador: a case study ». In : *Sixth international soil classification workshop*, Chile and Ecuador, part 1, SMSS (Washington), PUCC (Santiago de Chile) : 263-274.
- DE NONI G., NOUVELOT J. F., TRUJILLO G., 1986 a — Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos: las parcelas de Alangasi y Ilalo. Quito, Cedig/Orstom, *Documentos de investigación*, 6 : 35-47.
- DE NONI G., TRUJILLO G., VIENNOT M., 1986 b — L'érosion et la conservation des sols en Équateur. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 235-245.
- DE NONI G., ASPIAZU P., FERNANDEZ M. A., 1986 c — Erosión eólica al norte de la hoya de Quito. Quito, Cedig/Orstom, *Documentos de investigación*, 6 : 69-78.
- DE NONI B., DE NONI G., FERNANDEZ M. A., PELTRE P., 1986 d — Accidentes climáticos y gestión de las quebradas de Quito. Análisis del aluvión de la Raya del 23 de enero de 1986. Quito, *revue de Cepeige* : 25-44.
- DE NONI G., POURRUT P., VIENNOT M., 1987 — « Analyse de l'impact du « Niño » 1982-1983 sur le milieu morphodynamique instable de l'Équateur ». In : *Climats et risques naturels* (actes du colloque), Paris, AFGP : 157-168.
- DE NONI B., DE NONI G., FERNANDEZ M. A., PELTRE P., 1988 — Drainage urbain et accidents climatiques à Quito (Équateur). Analyse d'un cas récent de crue boueuse. *Cah. Sci. hum.*, 24 (2) : 225-249.
- DE NONI G., VIENNOT M., TRUJILLO G., 1989-1990 — Mesures de l'érosion dans les Andes de l'Équateur. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 183-196.
- DE NONI B., DE NONI G., VIENNOT M., 1990 — « Le poids de l'histoire sur la morphogenèse agricole des Andes de l'Équateur ». In : *La Terre et les Hommes. Mélanges offerts à M. Derruau*, Clermont-Ferrand, APFLC : 511-534.
- DE NONI G., TRUJILLO G., VIENNOT M., 1992 — « Essai de análisis histórico, social y económico de la cangahua en el Ecuador ». In : *Suelos volcánicos endurecidos*, 1 carte et 5 tabl., México : 503-514.
- DE NONI G., JANEAU J. L., PRAT C., TRUJILLO G., VIENNOT M., 1994 a — « Hydrodynamique, érodibilité et conservation des sols volcaniques indurés d'Amérique latine (Équateur, Mexique et Nicaragua) : impact du matériau originel et effet de la réhabilitation agricole. » In : *XVe Congrès international de science du sol*, vol. 6 a, commission V, Acapulco (Mexique) : 554-570.

- DE NONI G., TRUJILLO G., VIENNOT M., 1994 b — L'érosion agricole dans les Andes d'Équateur - Phénomène naturel ou phénomène historique. *In* : *Bull. Pédo. de la FAO*, 70 (GCES, E. Roose), Rome : 353-362.
- DE NONI G., ROOSE E., NOUVELOT J. F., 1995 — *L'environnement humain de l'érosion*. Bull. 14, Réseau Érosion, Orstom-CTA, Montpellier, 625 p.
- DELAUNAY D., 1989 — *Espacios demográficos y redes migratorias*. Coll. « Études de Géographie », Corporación Editora Nacional/Colegio de Geógrafos del Ecuador, Quito : 71-98.
- DELER J. P., 1981 — *Genèse de l'espace équatorien. Essai sur le territoire et la formation de l'État national*. Paris, IFEA, 279 p.
- DELER J. P., GÓMEZ N., PORTAIS M., 1983 — *El manejo del espacio en el Ecuador. Etapas claves, Geografía básica del Ecuador*. T. I, Quito, Cedit/Orstom, 239 p.
- DE PLOEY J., 1989 — *Soil erosion map of Western Europe*. Laboratoire expérimental de géomorphologie, Louvain (Belgique), Catena Verlag.
- DERRUAU M., 1988 — *Précis de géomorphologie*. Paris, Masson, 7^e édit., 533 p.
- DERRUAU M., DE NONI G., 1979 — Sur la géomorphologie des pyroclastites dans les Andes de l'Équateur (partie méridionale exclue). *Cah. Orstom, série Sci. Hum.*, 16 (3) : 251-259.
- DOLLFUS O., 1965 — *Les Andes centrales du Pérou et leurs piémonts. Étude géomorphologique*. Thèse, Bordeaux, 559 p.
- DOLLFUS O., 1981 — *El reto del espacio andino*. Lima, IEP, 141 p.
- DONKIN R. A., 1979 — *Agricultural terracing in the aboriginal new world*. Viking fund publications in anthropology, Arizona, 196 p.
- DUBUCQ M., 1986 — Télédétection spatiale et érosion des sols. Étude bibliographique. *Cah. Orstom, sér. Pédo.*, 22 : 247-258.
- DUCHAUFOUR Ph., 1995 — *Pédologie*. Paris, Masson, 4^e édit., 324 p.
- ELLISON W. D., 1944 — Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.*, 25 : 131-181.
- FAO, 1980 — *Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols*. Rome, FAO, 88 p.
- FAO, 1991 — *Problèmes et perspectives pour une agriculture et un développement rural durables*. Conférence FAO/Pays-Bas sur l'Agriculture et l'Environnement, 'S-Hertogenbosch, 32 p.
- FARELL G., DA ROS S., 1983 — *El acceso a la tierra del campesino ecuatoriano*. Quito, Mundo andino, 132 p.
- FARGA C., ALMEIDA J., 1981 — *Campesinos y haciendas de la Sierra norte*. Otavalo, Pendoneros, 362 p.
- FAUCHER B., SAVOYAT E., 1973 — Esquisse géologique des Andes de l'Équateur. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 15 (1-2) : 115-142.
- FAUROUX E., 1989 — « La grêle à Cangahua (Équateur) ». *In* Eldin M., Milleville P., éd. : *Le risque en agriculture*, Paris, Orstom, coll. « à travers champs » : 225-231.
- FIELDER M., PERROTT K. W., 1966 — The nature of allophane soils. Rapid field and laboratory test for allophane. Nouvelle-Zélande, *J. Sc.* 9 : 623-629.
- FOURNIER F., 1960 — *Les relations entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*. Paris, PUF, 201 p.
- FOURNIER F., 1966 — Utilisation des bassins-versants d'investigation hydrologique pour l'étude de l'érosion du sol. *Bull. de l'Association de géographes français*, 348-349 : 49-52.
- FRIETSCH J. M., SARRAILH J. M., 1986 — Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages. *Cah. Orstom, sér. Pédo.*, 22 (2) : 209-222.
- GALABERT J., MILLOGO E., 1972 — *Indice d'érosion par la pluie en Haute-Volta*. Rapport multigr., CTFT Haute-Volta, 57 p.
- GIMENO A., 1974 — « La expedición del general Flores al Ecuador como síntoma ». *In* : *Acti del 40 congreso internazionale degli americanisti*, Gênes, vol. 3 : 295-301.
- GONDARD P., LOPEZ F. + équipe du dépt de géographie de Pronareg, 1975-1983 — *Cartes d'utilisation actuelle des sols et des paysages végétaux de la Sierra*, échelles 1:50000 et 1:200000, Département

- de géographie de Pronareg-Orstom, Quito.
- GONDARD P., 1982 — « Carte de l'utilisation des sols de l'Équateur (1:4 000 000) ». In : *Atlas del Ecuador*, « J.A. » Edit., Paris/Quito : 46.
- GONDARD P., LÓPEZ F., 1983 — *Inventario arqueológico preliminar de los Andes septentrionales del Ecuador*. Quito, Pronareg/Orstom/Banco Central, 274 p.
- GRECO J., 1966 — *L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie*. Alger, Mara, 393 p.
- GRIL J. J., 1982 — *L'érosion dans le vignoble du Beaujolais. Étude comparative des techniques culturales sur la commune de Pommiers*. Cemagref, DDA, Chambre d'agriculture, Lyon, 28 p.
- GUILCHER A., 1965 — *Précis d'hydrologie marine et continentale*. Paris, Masson, 389 p.
- HEUSCH B., 1970 — L'érosion du pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. Rabat, *Annales de la Recherche Forestière au Maroc* (numéro spécial sur l'érosion), 12, : 9-176.
- HILLEL D., 1974 — *L'eau et le sol. Principes et processus physiques*. Louvain, Vander Ed., 288 p.
- HJULSTRÖM F., 1935 — Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyries. Uppsala, *Bull. Géol. Inst. Univ.*, 25 : 293-305, 442-452.
- HUDSON N. W., 1983 — *Soil conservation*. London, Batsford, 320 p.
- HUDSON N. W., 1991 — *A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects*. Rome, FAO Soil Bulletin, 64, 65 p.
- HUDSON N. W., 1992 — *Land Husbandry*. London, Batsford, 192 p.
- HUMBOLT A., 1838 — Geognostische und physikalische Beobachtungen über die Vulkane des Hochlands von Quito. *Poggendorffs Ann. Phys. Cham.*, 40, 44.
- HUMBOLT A., 1853 — *Kleine schriften geognostische und physikalische Erinnerungen*. Stuttgart und Tübingen.
- HUTTEL C., 1975 — Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de la basse Côte d'Ivoire, IV : estimation du bilan hydrique. *La terre et la vie, revue d'écologie appliquée*, 29 : 192-202.
- HUTTEL C., WINCKELL A., ZEBROWSKI C. y departamento de Geomorfología de Pronareg, 1982 à 1985 — *Mapas morfo-pedológico hojas, Valdez, Esmeraldas, Quininde, Santo Domingo de los Colorados, Quevedo, Guayaquil, Machala, Arenillas*, 1 : 200 000.
- IGM (Institut géographique militaire), 1982 — « Carte topographique de l'Équateur (1:3 500 000) ». In : *Atlas del Ecuador*, Paris/Quito, Édité « J. A » : 8-9.
- Inec, 1991 — *Recensement de population*. Document préliminaire, Quito.
- JIMENEZ DE LA ESPADA M., 1965 — *Relaciones geográficas de Indias*. Pérou, Biblioteca de autores españoles : 221.
- KALMAN R., 1967 — *Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin de Sebou (Maroc)*. Projet Sebou, 32 p.
- KNAPP G., 1988 — *Ecología cultural prehispánica del Ecuador*. Quito, Banco Central del Ecuador, 206 p.
- LA CONDAMINE J. M., 1986 — *Journal du voyage fait par ordre du Roi à l'Équateur, servant d'introduction historique à la mesure des 3 premiers degrés du méridien*. Coordination générale du Colloque « Ecuador 1986 », Quito, 221 p.
- LAFFORGUE A., 1977 — Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, 14 (4) : 299-343.
- LAL R., 1982 — Effects of slope length and terracing of runoff and erosion on a tropical soil. *IAHS Publ.*, 137 : 23-31.
- LAL R. (ed.), 1988 — *Soil erosion research methods*. Soil and Water conservation Society (Ankeny, Iowa-USA) et Soil Conservation and Environment International Society of Soil Science (Wageningen, Pays-bas), 244 p.
- LAOUNA A., 1998 — Dégénération des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. IRD Montpellier, *Bull. Réseau Érosion*, 18 : 33-53.
- LARRAIN BARROS H., 1980 — Demografía y asentamientos indigenas en la sierra Norte del Ecuador en el siglo XVI. Quito, Pendeneros, 213 p.

- LEAMY M., 1987 — International committee on the classification of Andisols. *Letter 9, Soil Bureau, Nouvelle-Zélande*.
- LE BISSONNAIS Y., 1988 — *Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous la pluie*. Thèse université d'Orléans/Inra, 220 p.
- LECARPENTIER C., OSTER R., 1979 — « L'érosion en milieu tropical tempéré par l'altitude : l'exemple des Andes colombiennes ». In : *Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen*, Strasbourg, université Louis-Pasteur/INRA : 43-48.
- LE COZ, 1964 — *Le Rharb. Fellahs et colons. Étude de géographie régionale*. Rabat, thèse lettres, 481 p.
- LEPRUN J. C., DA SILVEIRA C. O., SOBRAL FILHO R. M., 1986 — Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 223-234.
- LILIN C., 1986 — Histoire de la restauration des terrains en montagne au XIX^e siècle. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 22 (2) : 133-146.
- MASSON J. M., 1971 — *L'érosion par l'eau en climat méditerranéen*. Montpellier, thèse doct. Ing. USTL, 213 p.
- MIETTON M., 1988 — *Dynamique de l'interface Lithosphère-Atmosphère au Burkina-Faso. L'érosion en zone de savane*. Thèse, université de Grenoble-I, 511 p. + annexes.
- MURRA J., 1978 — *Organización económica del estado Inca*. México, Siglo XXI, 62 p.
- MURRA R., 1991 — La restauration des terrains en montagne dans l'approche actuelle de la conservation des sols. Montpellier, *Bull. Réseau érosion*, 12 : 11-20.
- NAHAL I., 1975 — *Principes de conservation des sols*. Paris, Masson, 143 p.
- NARANJO P., 1981 — *El clima del Ecuador*. Quito, Casa de la Cultura ecuatoriana.
- NEBOIT R., 1991 — *L'homme et l'érosion*. Clermont-Ferrand, Faculté des lettres et sciences humaines de Clermont-Ferrand-II, fasc. 34, 2^e édition, 269 p.
- NOUVELOT J. F., 1992 — *Érosion mécanique, transport solide, sédimentation dans le cycle de l'eau*. Orstom, Montpellier, 126 p.
- OBEREM O., 1981 — *El acceso a recursos naturales de diferentes ecologías en la Sierra ecuatoriana (siglo XVI) como contribución a la ethnohistoria ecuatoriana*. Otavalo, Pendoneros, 406 p.
- ORTIZ-SOLORIO C. A., 1990 — *Claves para la taxonomía de Suelos*. Trad. Agricultural handbook n° 436 complété pour les andosols C. P. et IMTA, Montecillo, Mexico DF, 576 p.
- PAREJA-DIEZCANSECO A., 1979 — *Ecuador: de la prehistoria a la conquista española*. Quito, Editorial Universitaria, 434 p.
- PELTRE-WURTZ J., 1989 — *El pan que comemos es estadounidense*. Quito, Corporación Editora Nacional/Colegio de Geógrafos del Ecuador, coll. « Études de Géographie » : 7-16.
- PEREZ A., 1947 — *Las mitas en la real audiencia de Quito*. Quito, Ministerio del Tesoro, 67 p.
- PIHAN J., 1979 — « Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France ». In Vogt T., Vogt J., éd. : *Colloque sur l'érosion agricole en milieu tempéré* : 13-18.
- POESEN J., 1987 a — « The role of slope angle in surface seal formation ». In : *International Geomorphology II*, Gardiner : 437-448.
- POESEN J., 1987 b — Transport of rock fragments by rill flow. A field study. *Catena*, suppl. 8 : 35-54.
- POESEN J., BRYAN R. B., 1989-1990 — Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 71-80.
- POURRUT P., 1983 — *Los climas del Ecuador. Fundamentos explicativos*. Quito, Cedig/Orstom, Documentos de investigación 4 : 8-43.
- POURRUT P., 1994 — *L'eau en Équateur. Principaux acquis en hydroclimatologie*. Paris, Orstom, coll. « Études et Thèses », 147 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 de doctorat, univ. Paris-VI, 350 p.
- PRESCOTT W., 1847 — *The conquest of Peru*. New York, 2 vol., 211 p.
- QUANTIN P., 1972 — Les andosols, revue bibliographique des connaissances actuelles. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 10 (3) : 273-301.
- QUANTIN P., 1992 a — *Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles-Hébrides (Vanuatu). Étude de la pédogenèse initiale en milieu tropical*. Paris, Orstom, coll. « Études et Thèses », 493 p.
- QUANTIN P., 1992 b — *Étude des sols volcaniques indurés (Tepetates) des bassins de Mexico et de Tlaxcala (Mexique)*. Rapport scientifique final CEE-Orstom, 77 p.
- QUANTIN P., 1994 — *The andisols, World Reference Base for Soil Resources*. Bondy, Orstom, 10 p.
- RAMÓN J., LÓPEZ M., 1981 — *La agricultura de los Andes ecuatorianos, comunidad andina, alternativas políticas de desarrollo*. Quito, CAAP : 3.
- RICQUET J., 1982 — Évaluation globale de la dégradation des terres. *Nature et Ressources*, 18 (25) : 19-23.
- ROOSE E., 1973 — *Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu inter-tropical*. Thèse Doct. Ing., Fac. Sci. Abidjan, Orstom, n° 20, 125 p.
- ROOSE E., 1977 — *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Paris, Orstom, coll. « Trav. et Doc. » 78, 108 p.
- ROOSE E., 1981 — *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale*. Paris, Orstom, coll. Trav. et Doc., 569 p.
- ROOSE E., 1994 — Introduction à la GCES. Rome, *Bull. pédologique de la FAO*, 70, 420 p.
- ROOSE E., NDAYIZIGIYE F., 1994 — « L'agroforesterie et la GCES au Rwanda ». In : *Introduction à la GCES*, Rome, *Bull. pédologique de la FAO*, 70 : 309-326.
- ROOSE E., DE NONI G., 1998 — Apport de la recherche à la lutte antiérosive : bilan mitigé et nouvelle approche. *Étude et Gestion des Sols*, 5 (3) : 181-194.
- RUBIO ORBE G., 1987 — *Los indios ecuatorianos: evolución histórica y políticas indigenistas*. Quito, Corporación editora nacional, 226 p.
- SARRAILH J. M., 1983 — « Les parcelles de ruissellement : synthèse de 4 années d'étude ». In : *Projet ECE-REX, C.R. les journées de Cayenne* : 394-403.
- SAUER W., 1965 — *Geología del Ecuador*. Quito, Editorial del Ministerio de Educación, 383 p.
- SEPULVEDA C., 1982 — *Estructuras agrarias y reproducción campesina*. Quito, Pontifica Universidad Católica del Ecuador, 294 p.
- SHAXON T. F., HUDSON N. W., SANDERS D. W., ROOSE E., MOLDENHAUER W. C., 1989 — Land Husbandry: a framework for soil and water conservation. WASWC, Ankeny, Iowa, USA, *Soil and water Cons. Soc.*, 64 p.
- SHERMAN G. D., MATSUAKA Y., IKAWA H., UEHARA G., 1964 — The role of the amorphous fraction in the properties of the tropical soils. *Agrochimica Ital.*, 8 (2) : 148-162.
- SHOJI S., MASUI J., 1969 — Amorphous clay minerals of recent volcanic ash soils in Hokkaido. *Soil Sc. Plant. Nutrit. jap.*, 15 (4) : 161-168.
- SHOJI S., ITO T., SAIGUSA M., YAMADA I., 1985 — « The case for recognizing a suborder of non-allophanic andisol (Alland) ». In : *Proc. 6th Inter. Soil Clas. Workshop*, Chile-Ecuador : 175-189.
- SHOJI S., OTOWA M., 1988 — « Distribution and significance of Andisols in Japan ». In : *Proc. 9th Soil Clas. Workshop*, Japan : 13-24.
- SIEFFERMANN G., 1969 — *Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun*. Thèse, Strasbourg, 285 p.
- SOHR R., 1983 — El Niño. Artículo del periódico *Hoy*, 12/07/83, Quito.
- Soil Survey Staff, 1975 — *A basic system of soil classification for making and interpreting soils surveys*. SCS Washington D. C., Agriculture Handbook 436, Soil Taxonomy, 754 p.

- SOURDAT M., CUSTODE E., 1983 — *Mapa edafológico, escala 1/500000: Provincias del Napo, de Pastaza, de Morona-Santiago norte, de Morona-Santiago sur y zamora Chinchipe*, 4 hojas de colores. Quito, MAG/Orstom, IGM.
- SOURIS M., 1995 — *Modèles numériques de terrain de la Sierra de l'Équateur*. Quito, mission Orstom.
- TRICART J., 1962 — *L'épiderme de la terre. Esquisse d'une géomorphologie appliquée*. Paris, Masson, 167 p.
- TRICART J., 1965 — *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Paris, Masson, 496 p.
- TRICART J., 1978 — *Géomorphologie applicable*. Paris, Masson, 204 p.
- TROLL C., 1959 — *Die tropischen Gebirge, ihre drei dimensionale klimatische und planzengeographischen zonierung*. Bonner geogr. Abh., heft 25, 93 p.
- TROLL C., 1968 — « Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical America ». In : *Colloquium Geographicum*, Band 9, Bonn : 15-56.
- VALENTIN C., 1979 — « Problèmes méthodologiques de la simulation de pluie. Application à l'étude de l'érodibilité des sols ». In Vogt H., Vogt T., éd. : *Colloque sur l'érosion agricole en milieu tempéré*, Strasbourg, Inra : 117-122.
- VALENTIN C., 1985 — *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques*. Paris, Orstom, coll. « Études et Thèses », 259 p.
- VEYRET Y., PECH P., 1993 — *L'homme et l'environnement*. Paris, PUF, 423 p.
- VOS R., 1988 — « Petroléo, estado y cambio agrario. Ecuador 1972-1984 ». In : *Geografía básica del Ecuador, V- Geografía agraria*, vol. 1, Quito : 15-36.
- WADA S. I., WADA K., 1977 — Density and structure of allophane. *Clay Mine.*, 12 : 89-298.
- WADA K., 1980 — *Mineralogical characteristics of andisols*. Japon, Ed. Theng : 87-107.
- WASSMER P., 1987 — *Description d'une méthode d'étude de l'érosion sous cultures sur fortes pentes. Les parcelles expérimentales*. RRAM Project, 27 p.
- WINCKELL A., DE NONI G., SOURDAT M., 1982 — « Carte géomorphologique de l'Équateur (1:4000000) ». In : *Atlas del Ecuador*, j.a. édit., Paris : 14-15.
- WINCKELL A., ZEBROWSKI C. + équipe du dépt de Géomorphologie de Pronareg, 1975-1983 — *Cartes morpho-pédologiques et d'Aptitudes Agricoles de la Côte, 1:200000*. Quito, Département de Géomorphologie et de Télédétection de Pronareg/Orstom.
- WISCHMEIER W. H., SMITH D., 1978 — Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Washington D.C., *Agriculture Handbook*, 537, 58 p.
- WISCHMEIER W. H., SMITH D., 1981 — *Predicting rainfall conservation planning*. Washington, USDA, 51 p.
- WOLF Th., 1975 — *Geografía y geología del Ecuador*. Quito, Casa de la Cultura Ecuatoriana, 798 p.
- ZEBROWSKI C., 1992 — Los suelos volcanicos endurecidos en America latina. Mexico, *Terra*, 10, num. spécial : 15-23.
- ZINGG A., 1940 — Degree and length of slope as it affects soil loss in runoff. *Agr. Eng.*, 21 : 3-8.

Résumé

Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes

Mots clés

Érosion – Ruissellement – Andosols – Lutte antiérosive – Montagne andine

L'Équateur est un pays montagneux et volcanique, représentatif de la cordillère des Andes dans son segment situé entre les tropiques. La montagne, appelée « Sierra », présente une situation singulière : à la suite d'un processus de réforme agraire aux résultats contestables, un grand nombre de petits paysans ont été déplacés vers les versants et les hautes terres, qui portent un damier formé de nombreuses petites parcelles de cultures faiblement productives, le minifundio. Cet agrosystème d'altitude favorise l'accélération de l'érosion des sols, dans un milieu montagnard où ce type de risque est naturellement élevé. Le petit paysannat du minifundio est confronté à une érosion très active qui affecte ses potentialités alimentaires.

L'absence de mesures antiérosives efficaces et adaptées au contexte socio-économique du paysannat concerné pénalise fortement la durabilité de l'agrosystème.

Pour lutter contre l'érosion de ces terres, un programme de recherche en coopération accordant une large place à la participation du paysannat et associant recherche cognitive et application a été mis en œuvre par le ministère équatorien de l'Agriculture et l'IRD suivant trois phases complémentaires. La phase initiale, qualitative et spatiale, pose les principaux éléments de diagnostic de la situation érosive de la Sierra équatorienne. Elle fait apparaître l'action prédominante du ruissellement concentré, notamment dans les parties nord et centre de la Sierra, où les sols ou andosols sont dérivés de matériaux volcaniques. L'affleurement en surface de la « cangahua », une formation composée d'horizons indurés, est révélateur de l'extension de l'érosion.

La phase suivante s'est attachée à l'étude des principaux facteurs de l'érosion et de leurs interrelations, par des mesures effectuées dans

sept stations expérimentales implantées au sein de grands bassins représentatifs des agrosystèmes et des minifundios de la Sierra. Les résultats montrent la grande érodibilité des andosols lorsqu'ils sont travaillés (de 50 à plus de 100 t ha⁻¹ par an). Retarder la naissance du ruissellement par le travail du sol, dissiper son énergie en intervenant sur l'inclinaison des versants, sensibiliser le paysan à la lutte antiérosive et l'inciter à agir durablement sont les principales recommandations qui ressortent de l'analyse à ce stade du programme.

La troisième et dernière phase a permis de tester, d'abord sur de grandes parcelles de ruissellement de 1 000 m² puis chez le paysan, des ouvrages antiérosifs inspirés des pratiques locales et destinés à dissiper l'énergie du ruissellement. Ainsi s'est développée une véritable stratégie participative du paysannat qui a permis de mettre en œuvre des améliorations telles que la réalisation de bandes enherbées, de murets de mottes ou de pierres, de fossés d'infiltration. Le broyage de la cangahua et son enrichissement par incorporation de matières organiques ont aussi été testés. Après cinq années de mesures, l'érosion s'est considérablement réduite (moins de 10 t ha⁻¹ par an) et les rendements de cultures se sont améliorés permettant de dégager un surplus auquel aspire le paysan. Grâce à une opération originale de crédit associant l'État, la banque et le paysannat, il a été possible de transposer avec succès les acquis expérimentaux à l'échelle du terroir.

Bien qu'encourageants, ces résultats ne suffiront pas s'ils ne sont pas englobés dans un processus général d'amélioration de la production agricole et de la qualité de vie des paysans qui doit intégrer, outre la lutte antiérosive, la fertilisation, l'amélioration variétale des semences, etc.

Sur le plan technique, cette évolution est possible dans la plupart des régions du globe, dont les Andes. Comme le montre notre recherche dans la Sierra équatorienne, l'homme a les moyens de mieux protéger la fertilité des sols et l'équilibre dynamique des paysages, afin de tendre vers la durabilité de l'agrosystème.

Sur le plan socio-économique, le petit paysan ne pourra assumer seul ce défi. Il est nécessaire qu'une véritable concertation s'établisse entre la population du minifundio, les chercheurs-techniciens et les responsables politiques. Ce n'est que par la participation forte et conjointe de l'État et du petit paysannat que seront établies les bases d'une agriculture de montagne durable sous les tropiques qui, outre les paysans de la cordillère des Andes, intéressent également les populations paysannes des montagnes d'Afrique de l'Est, d'Asie et de Méditerranée.

Summary

Highlands, vulnerable land. Erosion control in the Ecuadorian Andes

Key words

Erosion – Runoff – Andosols – Erosion control – Andes

Ecuador is a mountainous, volcanic country typical of the tropical part of the Andes range. The situation in the mountains—the *Sierra*—is special. Following an agrarian reform process with questionable results, many small farmers were shifted to slopes and highland areas, where many small cropped fields form a checkerboard pattern with low productivity, the «*minifundio*». This highland agrosystem enhances the acceleration of soil erosion in a mountain environment where this type of risk is naturally high. The *minifundio* small farmers are confronted with catastrophic erosion affecting their food production potential.

The absence of effective erosion control measures adapted to the socioeconomic context of the small farmers concerned strongly penalizes agrosystem sustainability.

In order to combat the erosion of this land, a research programme with an important role awarded to farmer participation, combining cognitive research and practical application and with three complementary phases was launched with co-operation between the Ecuadorian Ministry of Agriculture and IRD. The initial qualitative and spatial phase set out the main elements of an appraisal of the erosion situation in the Ecuadorian *Sierra*. This showed the dominant effect of concentrated runoff, especially in the northern and central parts of the *Sierra* where the soils, or andosols, have formed from volcanic materials. The outcropping of '*cangahua*', a formation consisting of indurated horizons, revealed the large area affected by erosion.

The next phase concerned the study of the main causal factors of erosion and their interrelations by measurements performed at seven experimental stations in large drainage basins representative of the *Sierra* agrosystems. The results revealed the great erodibility of the tilled andosols (from 50 to

over 100 t ha⁻¹ per year⁻¹). The main recommendations that emerged from analysis at this stage of the programmes concerned the slowing of the beginning of runoff, working on slope gradients and making farmers aware of erosion control and encouraging them to perform sustainable actions.

The third and last phase has made it possible to test erosion control works inspired by local practices. They are aimed at dissipating runoff energy and were tested first in large 1000-m² runoff fields and then under on-farm conditions. Erosion decreased considerably over the five years of observation (to less than 10 t ha⁻¹ per year⁻¹) and crop yields improved, leading to the surpluses that farmers hope for.

Although they are encouraging, these results will not be sufficient unless they are incorporated in a general process of improvement of agricultural production and of agrosystem sustainability. In addition to soil conservation, this should include fertilization, irrigation, varietal improvement of seed, etc.

From the technical point of view, this evolution is possible in most parts of the world, including the Andes. Our research in the Ecuadorian *Sierra* shows that man has the means to achieve better protection of soil fertility and the dynamic equilibrium of landscapes in order to move towards agrosystem sustainability.

Small farmers cannot take up this challenge unaided. There is a need for true concertation between the population of the *minifundio*, researchers/technicians and political leaders. The basis for sustainable mountain farming in the tropics can only be achieved with strong joint participation by the state and small farmers. This type of agriculture concerns not only farmers in the Andes but also small farmers in the mountain areas in East Africa, Asia and the Mediterranean.

Traduction

Simon BARNARD

Resumen

Tierras de altura, tierras de riesgo. La lucha contra la erosión en los Andes del Ecuador

Palabras claves

Erosión – Esguerrimiento – Andosoles – Lucha antierosiva – Montaña andina

El Ecuador es un país montañoso y volcánico, representativo de la cordillera de los Andes en su segmento situado entre los trópicos. La montaña, llamada « Sierra », presenta una situación particular : siguiendo un proceso de reforma agraria a los resultados discutibles, un gran número de pequeños campesinos han sido desplazados hacia las vertientes y las tierras altas, que llevan numerosas pequeñas parcelas de cultivo a cuadros pocas productivas, el minifundio. Dicho agrosistema de altura favorece la aceleración de la erosión de los suelos, en un medio montañoso donde este tipo de riesgo es naturalmente elevado. El pequeño campesinado del minifundio se encuentra frente a una erosión muy activa que afecta sus potencialidades alimenticias.

La ausencia de medidas antierosivas eficientes y adaptadas al contexto socio-económico del campesinado en referencia molesta la durabilidad del ecosistema.

Para luchar contra la erosión de esas tierras, un programa de investigación dando un gran puesto a la participación campesina y asociando investigación cognoscitiva y aplicación ha sido puesto en marcha mediante una cooperación entre el ministerio ecuatoriano de agricultura y el IRD, según tres fases complementarias. La fase inicial, cualitativa y cartográfica, plantea los principales elementos de diagnóstico de la situación erosiva de la Sierra ecuatoriana. Pone énfasis sobre la acción predominante del esguerrimiento concentrado, en particular en las partes norte y centro de la Sierra, donde los suelos o andosoles son derivados de materiales volcánicos. El afloramiento en superficie de la cangahua, una formación compuesta de horizontes indurecidos, es reveladora de la extensión de la erosión.

La fase siguiente se dedica al estudio de los principales factores de la erosión y de sus interrelaciones, por medidas efectuadas en siete estaciones experimentales establecidas en el seno de grandes cuencas representativas de los agrosistemas y de los minifundios de la Sierra. Los resultados muestran la gran erodibilidad de los andosoles cuando están cultivados (de 50 a más de 100 ha⁻¹ por año). Diferir el nacimiento del escurrimiento por el trabajo del suelo, disipar su energía actuando contra la inclinación de las vertientes, sensibilizar al campesino a la lucha antierosiva e incitarlo a cultivar duraderamente son las principales recomendaciones que salen del estudio a este nivel del programa.

La tercera y última fase ha permitido experimentar, en primer lugar sobre grandes parcelas de escurrimiento de 1000 m² y luego entre los campesinos, obras antierosivas inspiradas de las prácticas locales para poder disipar la energía del escurrimiento. Después de cinco años de observación, la erosión ha sido reducida considerablemente (menos de 10 ha⁻¹ por año) y los rendimientos de cultivos se han mejorado permitiendo sacar un excedente al cual aspira el campesino.

A pesar de ser esperanzadores, estos resultados no serán suficientes si no están incluidos en un proceso general de mejoramiento de la producción agrícola y de la calidad de vida de los campesinos que debe integrar, además de la conservación de suelos, la fertilización, el riego y el mejoramiento de las variedades de semillas etc ...

A nivel técnico, esta evolución es posible en la mayoría de las regiones del globo, incluyendo los Andes. Así lo muestra nuestra investigación en la Sierra ecuatoriana, el hombre puede proteger mejor la fertilidad de los suelos y el equilibrio dinámico de los paisajes para tender hacia la durabilidad del agrosistema.

A nivel socio-económico, solo, el pequeño campesino no puede asumir este desafío. Es necesario que una verdadera concertación se establezca entre la población del minifundio, los investigadores y técnicos, y los responsables políticos. Solo la participación fuerte y conjunta del Estado y del pequeño campesinado permitirá establecer las bases de una agricultura de montaña duradera entre los trópicos que, además, de los campesinos de la cordillera de los Andes, interesa también las poblaciones de las montañas campesinas de África del Este, de Asia y del Mediterráneo.

Traduction

Georges DE NONI

Table des illustrations

Table des cartes

Carte 1	— Relief de l'Équateur	hors-texte
Carte 2	— Situation de l'Équateur sur le continent sud-américain ...	12
Carte 3	— Principaux ensembles topographiques de l'Équateur	13
Carte 4	— Les sols de la Sierra	14
Carte 5	— Utilisation des sols dans le bassin de Cayambe à la suite des modifications agraires intervenues entre 1938 et 1988	34
Carte 6	— Principaux types d'utilisation des sols dans la Sierra	38
Carte 7	— Carte d'utilisation des sols d'Ibarra	hors-texte
Carte 8	— Carte d'utilisation des sols de Loja	hors-texte
Carte 9	— Le volcanisme quaternaire dans la Sierra	hors-texte
Carte 10	— Cartographie de l'érosion concentrée relayée par le ruissellement diffus sur les andosols vitriques et la cangahua du bassin de Latacunga	53
Carte 11	— Cartographie de l'érosion concentrée relayée par de petits mouvements de masse dans le bassin de Quito	60
Carte 12	— Cartographie de l'érosion concentrée relayée par l'érosion éolienne au pied du versant oriental du volcan Mojanda (partie nord du bassin de Quito)	64
Carte 13	— Typologie des principales manifestations de l'érosion en Équateur	68
Carte 14	— Grands bassins de l'Équateur	88
Carte 15	— Typologie des principales classes de pente	89
Carte 16	— Pluviométrie annuelle en mm (période 1965-1978) et isolignes d'intensité maximale en mm h ⁻¹ durant 30 mn et de fréquence médiane (IM 30)	125

Table des figures

Figure 1	— Évolution de l'utilisation du sol dans le bassin de Cayambe (région de Tupigachi)	23
Figure 2	— Étagement de la végétation dans la Sierra pyroclastique ...	37
Figure 3	— Le ruissellement concentré (bassin de Latacunga)	54
Figure 4	— Le ruissellement associé à des mouvements de masse (bassin de Quito)	59
Figure 5	— Érosion des andosols vitriques sous l'action conjuguée du ruissellement et du vent	65
Figure 6	— Dynamique du ruissellement concentré et diffus sur deux types de substrats	70
Figure 7	— Dispositif utilisé en station pour l'étude expérimentale du ruissellement et de l'érosion, en situation traditionnelle (témoin) et améliorée	77
Figure 8	— La simulation de pluies (dispositif et principes de fonctionnement)	84
Figure 9	— Coupe de cordillère à cordillère, traversant le bassin de Cayambe	90
Figure 10	— Coupe traversant le volcan Chimborazo, depuis le versant interne oriental jusqu'au piedmont côtier	91
Figure 11	— Coupe dans le bassin de Quito, où sont situées les stations de Tumbaco, Cangahua et Mojanda	94
Figure 12	— Coupe de cordillère à cordillère traversant les bassins de Catamayo et de Loja	103
Figure 13	— Coupe du site de la station de Jadan, dans le bassin de Cuenca	105
Figure 14	— Coupe du site de la station de Vega Grande, dans le bassin versant de Catamayo	108
Figure 15	— Érosion ($\log t \text{ ha}^{-1}$), ruissellement moyen annuel (KR _a) et KRM (%) (1986-1991). Témoin planté et témoin non planté (Tumbaco, Mojanda, Cangahua, Riobamba)	112
Figure 16	— Érosion ($\log t \text{ ha}^{-1}$), ruissellement moyen annuel (KR _a) et KRM (%) (1986-1991). Témoin planté et témoin non planté (Vega Grande, Ventanas)	113

Figure 17 — Ruissellement, érosion et pluies décennales. Témoin planté, témoin non planté (Tumbaco, 1988-1990)	118
Figure 18 — Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques (Cangahua)	120
Figure 19 — Comparaison sol en place, sédiments érodés. Résultats analytiques (Mojanda)	120
Figure 20 — Corrélation entre les valeurs globales d'érosion des stations et l'inclinaison de leur pente	122
Figure 21 — Corrélation érosion en fonction de l'IM 15 et de l'IM 30 (Tumbaco)	126
Figure 22 — Corrélation érosion en fonction de l'IM 15 et de l'IM 30 (Mojanda)	127
Figure 23 — Hydrogramme théorique de ruissellement pour une pluie d'intensité constante	134
Figure 24 — Variation de $R_{max} h^{-1}$ et des charges par station et par situation culturale	137
Figure 25 — Infiltration minimale (F_n) en fonction de l'intensité de pluie (Mojanda)	138
Figure 26 — Infiltration minimale (F_n) en fonction de l'intensité de pluie (Vega Grande)	139
Figure 27 — Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol (Jadan). Pluies d'intensité de 60 mm h^{-1} , sol nu et ancien labour	142
Figure 28 — Variation de F_n en fonction de l'ordre des pluies et de l'humidité du sol sur les sept stations. Pluies d'intensité de 60 mm h^{-1} , sol nu	143
Figure 29 — Simulation de pluies sur sol nu. Variation des charges (kg ha^{-1}) en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I , mm h^{-1})	145
Figure 30 — Régressions entre charges (kg ha^{-1}) et argile (%). $I = 60 \text{ mm h}^{-1}$	146
Figure 31 — La pratique du muret de <i>chambas</i> (station de Mojanda) ..	162
Figure 32 — Érosion et ruissellement moyen annuel KRa et KRM (%) à Tumbaco et Cangahua (1986-1991)	167

Figure 33 — Érosion et ruissellement moyen annuel KRa et KRM (%) à Mojanda et Riobamba (1986-1991)	168
Figure 34 — Érosion et ruissellement moyen annuel KRa et KRM (%) à Vega Grande et Ventanas (1986-1991)	169
Figure 35 — Variations du coefficient annuel moyen de ruissellement pour les 4 stations et les trois situations culturales	171
Figure 36 — Simulation de pluies sur prairie. Variation du ruissellement maximal (R, mm h ⁻¹) en fonction de l'état d'humidité préalable et de l'intensité de pluie (I, mm h ⁻¹)	180
Figure 37 — Transfert d'eau et de matière solide sur prairie sous pluie constante (Riobamba, Mojanda, Jadan)	181
Figure 38 — Relations pluie utile-lame ruisselée	183

Table des tableaux

Tableau I — Distribution (%) de la population des trois grandes régions naturelles de l'Équateur par rapport à la population totale du pays et à la population urbaine et rurale, en 1982 et 1991 (INCE, 1991)	22
Tableau II — La structure agraire en Équateur de 1954 à 1985. Nombre d'exploitations et superficies occupées (en %) (MAG, 1954-1985)	32
Tableau III — La production agricole dans la Sierra de 1970 à 1985 (en milliers de tonnes)	33
Tableau IV — Caractéristiques des dynamiques d'érosion de la Sierra ..	69
Tableau V — Apports et limitations des parcelles expérimentales de ruissellement et des simulations de pluies	85
Tableau VI — Analyse des sols des stations de Mojanda et Riobamba ..	98
Tableau VII — Analyse des sols des stations de Tumbaco et Cangahua ..	98
Tableau VIII — Analyse des sols des stations de Jadan, Vega Grande et Ventanas	99
Tableau IX — Présentation des bassins versants et des stations	110
Tableau X — Valeurs moyennes par station des coefficients de ruissellement (KRM, %) et de l'érosion (Ér. en t ha ⁻¹) pour toute la période d'expérimentation (1986-1991)	114

Tableau xi — Érosion provoquée par les cinq pluies les plus érosives (kg ha ⁻¹)	128
Tableau xii — Synthèse des résultats des parcelles de ruissellement et des simulations de pluies	147
Tableau xiii — Ruissellement et érosion sur les parcelles améliorées (1986-1991)	166
Tableau xiv — Coûts de construction et d'entretien des ouvrages	175

Table des matières

Sommaire	7
Préface	9
Introduction	11

L'ÉROSION DES SOLS : FACTEURS ANTHROPIQUES ET PROCESSUS

Un agrosystème d'altitude à forts risques érosifs	21
<i>L'agriculture précoloniale</i>	<i>22</i>
Des productions agricoles diversifiées, avec rotations et associations de cultures	
Le contrôle de l'eau et de l'érosion	
L'utilisation des engrais	
<i>L'agriculture coloniale</i>	<i>26</i>
Une forte diminution de la population indigène	
L'asservissement des populations	
La mise en place de l'agriculture « castillane »	
L'introduction de nouvelles cultures	
Le développement de l'élevage	
La mise en œuvre de nouvelles pratiques agricoles	
<i>L'agriculture délocalisée en altitude</i>	<i>29</i>
Les structures agraires avant 1960	
Les mutations agraires et la délocalisation du minifundio	
Les conséquences sur les structures agraires	
L'inégalité des structures agraires	
Une érosion accélérée	
Le constat d'échec de la lutte antiérosive dans la Sierra	39
<i>La lutte antiérosive dans l'agriculture de la Sierra</i>	<i>40</i>
Par les paysans du minifundio	
Initiées par l'État, des mesures ponctuelles et inadaptées	
<i>Les causes des échecs</i>	<i>44</i>

L'érosion accélérée des sols dans la Sierra	49
<i>L'importance de l'érosion accélérée</i>	49
<i>Les principales dynamiques de l'érosion des sols dans la Sierra</i>	52
Le ruissellement concentré relayé par le ruissellement diffus	
Dans la dépression volcanique	
Dans la Sierra méridionale	
Dans les cordillères	
L'érosion concentrée associée à des mouvements de masse	
Dans la Sierra volcanique	
Dans la Sierra méridionale	
L'association de l'érosion concentrée et de l'érosion éolienne	
<i>Caractéristiques des dynamiques érosives dans la Sierra</i>	67
 MESURER L'ÉROSION	
Les parcelles expérimentales et la simulation de pluies	75
<i>L'approche expérimentale et quantitative</i>	76
<i>Les parcelles expérimentales de ruissellement</i>	77
<i>Les simulations de pluies</i>	81
Caractéristiques des stations	87
<i>Les bassins versants volcaniques de Guayllabamba et de Pastaza</i>	87
Les cordillères à hauts volcans	
Les sols et leur environnement	
La station de Mojanda	
La station de Riobamba	
La dépression pyroclastique	
Les sols et leur environnement	
La station de Tumbaco	
La station de Cangahua	
<i>Les bassins versants cristallins et sédimentaires de Santiago et Catamayo</i>	103
Les cordillères du socle	
La dépression sédimentaire	
La station de Jadan	
La station de Vega Grande	
<i>Le bassin versant de Guayas</i>	108
Une station de piedmont	
La station de Ventanas	

Les résultats des parcelles de ruissellement témoins	111
<i>Les résultats globaux</i>	<i>111</i>
<i>Les résultats par facteurs</i>	<i>117</i>
Le facteur végétation	
L'effet du sol	
L'effet de la pente	
L'effet des précipitations	
<i>Hierarchie des facteurs</i>	<i>129</i>
Les résultats des simulations de pluies	131
<i>Les protocoles</i>	<i>131</i>
Situations culturales, intensités simulées et humidité du sol	
Les données retenues	
<i>Les résultats des simulations de pluies</i>	<i>136</i>
L'effet « situation culturelle »	
L'effet sol	
<i>L'érodibilité des andosols</i>	<i>147</i>

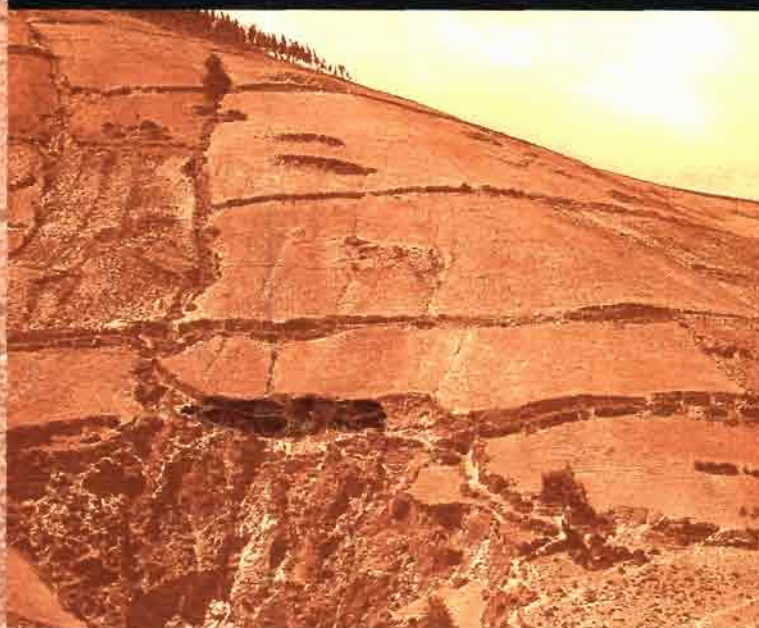
**LA LUTTE ANTIÉROSIVE DANS LES ANDES ÉQUATORIENNES.
DE L'EXPÉRIMENTATION À L'APPLICATION**

La lutte antiérosive : mythe ou réalité ?	153
<i>Les fondements généraux de la démarche participative</i>	<i>154</i>
<i>La démarche participative en Équateur</i>	<i>157</i>
Intervenir sur le ruissellement	
Les parcelles expérimentales améliorées et démonstratives	
Les résultats :	
l'expérimentation au service de la lutte antiérosive	161
<i>Les parcelles expérimentales améliorées</i>	<i>161</i>
Le dispositif stationnel	
Les résultats des parcelles de ruissellement améliorées	
Des pertes en terre et en eau réduites de façon significative	
Des rendements améliorés	
Des ouvrages antiérosifs adaptés aux conditions du minifundio	
Un essai de valorisation en grandeur nature	

<i>Les simulations de pluies en situations améliorées</i>	177
Dispositif et protocole	
Les résultats des pluies simulées en situation améliorée	
Le sol enherbé	
La cangahua réhabilitée	
<i>La possible lutte antiérosive</i>	185
Conclusion	189
Références	197
Résumé	205
<i>Summary</i>	207
<i>Resumen</i>	209
Table des illustrations	211
Table des matières	217

Mots clés

Érosion
Ruissellement
Andosols
Lutte antiérosive
Montagne andine



En milieu montagnard tropical, où les risques d'érosion sont naturellement élevés, la mise en culture des terres entraîne l'aggravation des processus. Ainsi, les versants des Andes équatoriennes, intensément cultivés, connaissent une érosion qui affecte la fertilité des sols et donc la production agricole dont dépend le petit paysan (minifundio) pour son alimentation. Il est urgent d'apporter des mesures de lutte antiérosives efficaces et adaptées aux conditions socio-économiques de la population. Mais les connaissances sur l'érosion et la lutte antiérosive dans le monde tropical, en particulier dans les milieux montagnards, sont encore fragmentaires, les scientifiques ayant longtemps privilégié l'étude théorique des processus.

L'objectif de la recherche présentée dans cet ouvrage est de proposer une approche qui associe recherche fondamentale et appliquée permettant la mise en œuvre pratique de méthodes de lutte antiérosive. Cette étude s'est déroulée en trois étapes : diagnostic de l'érosion, mesures des processus, proposition et validation de méthodes antiérosives. Menée à l'échelle du terroir et de la parcelle paysanne, suivant une démarche formative et participative associant paysans, chercheurs et décideurs, elle montre que la lutte contre l'érosion est possible sur les hautes terres andines. Cette approche peut servir d'exemple pour poser les bases d'une agriculture de montagne durable en milieu tropical.

Cet ouvrage s'adresse aux universitaires et chercheurs en géographie, pédologie, hydrologie et agronomie et par sa présentation didactique aux étudiants ainsi qu'aux décideurs.



213, rue La Fayette
75480 Paris cedex 10

Diffusion :
32, avenue Henri-Varagnat
93143 Bondy cedex
fax : 01 48 02 79 09
diffusion@bondy.ird.fr
www.ird.fr

€ 22.90

ISSN 1278-348X
ISBN 2-7099-1469-7